

ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ НА УРАЛЕ

История научных направлений
Института физики металлов

Екатеринбург
2017

УДК 061.62(470.54)
ББК 72.4(235.55)712
Ф 50

*Рекомендовано к изданию ученым советом
Института физики металлов*

Ф 50 **ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ НА УРАЛЕ. История научных направлений Института физики металлов.** Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2017 –616 с.
ISBN 978-5-903359-12-7

В сборнике материалов представлена ретроспектива формирования и развития научных направлений Института и всех его лабораторий от образованного в 1932 году Уралфизтеха до ИФМ УрО РАН образца 2017 года.

Главный редактор – академик РАН В.В. Устинов

Руководитель проекта – М.В. Дегтярев

Рецензент – М.А. Коротин

CURRICULUM VITAE

Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН

ISBN 978-5-903359-12-7

© ИФМ УрО РАН, 2017
© Коллектив авторов

Curriculum vitae в переводе с латинского – «ход жизни». В научных кругах этот термин обычно применяется для обозначения краткого описания жизни и профессиональных навыков научных работников. Мы же попытаемся составить Curriculum vitae целого научного института – Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, который празднует в 2017 году свой 85-летний юбилей.

Важнейшим элементом жизнеописания научного института является история становления и развития **основных направлений научных исследований**. Термин «Основные направления научных исследований», характеризующий стратегические пути развития научного института, стал употребляться как юридическое понятие лишь с 1970 года, когда Президиум Академии наук СССР впервые официально утвердил основные направления исследований для всех научных учреждений Академии наук СССР. До этого времени основные направления работы либо находили своё отражение в названии самого института и названиях созданных в нём научных подразделений (групп, лабораторий, отделов), либо просто фигурировали в том или ином виде в различных служебных документах.

Ниже вниманию читателя будут представлены два раздела. Первый призван осветить основные направления научных исследований нашего института в целом, тогда как во втором разделе направления научных исследований будут детализированы на уровне лабораторий.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

научных исследований Института –
от Уральского физико-технического института (1932)
до Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН (2017)

1932–1939: УралФТИ

Научные направления Уральского физико-технического института (УралФТИ), созданного в 1932 г. и давшего начало истории Института физики металлов, были сформулированы академиком Абрамом Фёдоровичем Иоффе.

В подписанном им 20 января 1932 г. приказе № 5 по Ленинградскому физико-техническому институту о выделении из состава ЛФТИ группы Уральского физико-технического института все переводимые в УралФТИ сотрудники были распределены по четырём группам. Приказом № 1 по Уральскому физико-техническому институту от 26 января 1932 г. [1] вышеупомянутым группам был придан статус структурных подразделений института. Ниже приведены названия этих групп, которые фактически и составили основные направления научных исследований Уралфизтех образца 1932 г.:

Группа 1. *Магнитные и электрические явления.*

Группа 2. *Изучение механизма фазовых превращений в сплавах.*

Группа 3. *Изучение пластической деформации металлов.*

Группа 4. *Электроннография.*

Заданные академиком А.Ф. Иоффе направления научных исследований надолго определили вектор развития института. Первым директором Института по предложению А.Ф. Иоффе был назначен Михаил Николаевич Михеев, 26-летний аспирант ЛФТИ.

Именно на долю М.Н. Михеева выпала практическая реализация сформулированных академиком А.Ф. Иоффе идей о направлениях развития Института. Начатая М.Н. Михеевым многотрудная работа по формированию научного лица Уралфизтех была прервана



Абрам Фёдорович Иоффе
(1880–1960 гг.)



Михаил Николаевич Михеев
(1905–1989 гг.)

в 1937-м году, когда он был снят с должности директора «за притупление бдительности».

Сравнение вышеприведённого перечня с содержанием последующих параграфов настоящей статьи позволит читателю проследить непрерывную связь направлений, заложенных академиком Иоффе при создании Уралфизтеха, с направлениями исследований сегодняшнего ИФМ. Ниже мы приведём выдержки из различных документов, хранящихся в архивах РАН, УрО РАН и ИФМ УрО РАН, в которых имеется информация о трансформациях направлений научных исследований института.

В докладной записке временно исполняющего обязанности директора института М.В. Якутовича председателю Техсовета Народного комиссариата тяжёлой промышленности о работе Уральского физико-технического института, написанной в 1937 г., указывалось [2]:

«Два основных направления работы ин-та на 3-е пятилетие:

1. Экспериментальная физика, теоретическая физика и химическая физика металлического состояния, направленная на разработку путей получения сплавов со специальными технически важными свойствами и на разработку новых и усовершенствование старых металлургических процессов получения и обработки металлов.

2. Разработка новых и внедрение уже имеющихся физических методов контроля технологических процессов, изделий и конструкций металлургической промышленности».

1939–1945: Институт МММ

До 1939 г. Уральский физико-технический институт находился в ведении Наркомата тяжёлой промышленности СССР. В январе 1939 г. институт был передан в ведение Наркомата чёрной металлургии СССР. Спустя всего лишь 4 месяца – в мае 1939 г. – УралФТИ был передан в систему Академии наук СССР. Первым результатом перехода в Академию наук СССР стало изменение названия института. Постановлением Президиума АН СССР (протокол № 19 от 16 июня 1939 г. [3]) на базе УралФТИ был создан Институт металлофизики, металловедения и металлургии в составе Уральского филиала АН СССР (ИМММ УФААН СССР).

О научных направлениях ИМММ можно судить по Отчёту о работе ИМММ УФААН СССР за первое полугодие 1941 года, в котором говорится [4]:

«Как и в 1940 г. Институт Металловедения, металлофизики и металлургии работал по трём основным направлениям:

1. Изыскание и разработка методов улучшения свойств металлов и сплавов;

2. Разработка физических методов контроля производственных процессов и качества продукции металлопромышленности;

3. Разработка новых, интенсификация и улучшение существующих процессов металлургии чёрных и цветных металлов».

Здесь будет уместным несколько отвлечься от нашего анализа научных направлений Института. Читателю, возможно, будет интересно узнать об имевшем место курьёзе с названием ИМММ УФААН. Уже в вышеупомянутом Постановлении Президиума АН СССР имеются разночтения в новом наименовании института. В основном тексте Постановления говорится о создании института «Металлофизики, металловедения и металлургии», тогда как в Приложении к тому же самому Постановлению, в котором устанавливается структура УФААна, фигурирует другое название – «Институт металловедения, металлофизики и металлургии». В течение последующих полутора лет использовался именно последний вариант названия, в котором на первое место среди трёх «М» было определено именно «металловедение». Рискну высказать предположение, что инверсия «металлофизики» и «металловедения» с выдвиганием «металловедения» на первый план могла быть связана с тем, что директором ИМММ был назначен видный советский учёный-металловед член-корреспондент АН СССР Сергей Самойлович Штейнберг.

Перетасовка трёх «М» в названии института, однако, на этом не закончилась. В январе 1941 г. на должность директора ИМММ вместо член-корреспондента АН СССР С.С. Штейнберга по представлению Президиума УФААна был назначен кандидат химических наук Н.В. Деменев, занимавший в то время должность заместителя председателя Президиума УФААна. Н.В. Деменев стал руководить Институтом МММ по совместительству, оставаясь заместителем председателя Президиума УФААН СССР. В соответствующих документах УФААна о назначении Н.В. Деменева директором ИМММ последний официально именовался уже как «Институт металлургии, металловедения и металлофизики». Теперь первая буква «М» в названии символизировала уже не металловедение, но металлургию. Возможно, что новая перетасовка терминов в названии ИМММ с выдвиганием на первое место теперь уже «металлургии» была важна для Н.В. Деменева, специалиста в области химии и технологий редких элементов, для которого вопросы как металловедения, так и металлофизики не были, вероятно, первостепенными.

Манипуляции руководства УФААна с буквами «М» в названии ИМММ продолжились в 1943 г. Президиум УФААна принимает Положение об Институте, который теперь именуется как «Институт металлофизики и металлургии Уральского филиала Академии наук СССР» (ИММ УФААН СССР) (протокол № 5 от 16 сентября 1943 г.) [5]. По воле Президиума УФААна «металловедение» (вторая «М») – исчезает из названия Института. Сегодня трудно понять логику этого переименования ИМММ в ИММ, тем более что в этом же вышеупомянутом Положении «металловедение» все-та-

ки упоминается. Цитирую: «Основными задачами Института являются всемерное развитие соответствующих отраслей советской науки, изучение и всестороннее использование достижений передовой научной мысли в области экспериментальной и теоретической физики металлов, металлургии и металловедения в целях развития производительных сил Урала и Союза ССР в целом».

Таким образом, подводя итог по разделу, можно считать, что основными направлениями Института в период 1939–1945 гг. были *металлофизика, металловедение и металлургия*.

1945–1958: ИФМ УФАН СССР

В 1945 г. Президиум УФАНа принимает Постановление [6] о передаче лабораторий металлургических процессов чёрных и цветных металлов из состава Института металлофизики и металлургии в состав Химического института и о переименовании Института металлофизики и металлургии, который получает новое имя «Институт физики металлов Уральского филиала Академии наук СССР» (ИФМ УФАН СССР). Директором ИФМ назначается кандидат физико-математических наук Михаил Николаевич Михеев.

Выписка из отчёта директора, кандидата технических наук М.Н. Михеева о работе Института физики металлов за 1945 г. гласит [7]:

«В 1945 г. работы Института Физики Металлов проходили по следующим направлениям:

1. Научное обоснование новых и существующих технологических процессов обработки стальных и чугуновых изделий.
2. Жаростойкие сплавы.
3. Физические методы анализа контроля технологических процессов, сырья и продукции заводов.
4. Дальний порядок атомов в бинарных сплавах и физические свойства сплавов.
5. Теория технической кривой намагничивания».

«Физическая» направленность научных исследований ИФМ закрепляется Постановлением № 359 Президиума Академии наук СССР от 26 апреля 1957 г. об итогах и перспективах деятельности Института физики металлов [8]: «Считать главной задачей Института физики металлов УФАНа разработку в системе АН СССР следующих важнейших проблем физики металлов: квантовая теория твёрдого тела, связь структуры кристаллов с их физическими свойствами, магнитные и электрические свойства вещества, природа сил связи, фазовые превращения, диффузия, пластическая деформация, прочность и механизм разрушения в металлах и сплавах».

1958–1971: ИФМ АН СССР

В 1958 году начинается новый этап в истории ИФМ. Постановлением № 184 Президиума АН СССР [9] Институт физики ме-

таллов выделяется из Уральского филиала АН СССР в самостоятельный институт с непосредственным подчинением Отделению физико-математических наук АН СССР: Институт физики металлов Академии наук СССР (ИФМ АН СССР). Оценку этого события и формулировку направлений научной работы ИФМ АН СССР можно найти в протоколе заседания Бюро Отделения физико-математических наук АН СССР № 4 от 2 марта 1960 г. [10]: «Бюро Отделения физико-математических наук АН СССР отмечает, что непосредственное подчинение Института как самостоятельного учреждения Отделению физико-математических наук, осуществлённое в 1958 году в соответствии с решением Президиума АН СССР, сыграло положительную роль в развитии Института..»

Основная научная тематика Института сосредоточена на проблемах, утверждённых Общим собранием АН СССР в 1959 г. 1/ физика твёрдого тела /физика магнитных явлений и физика прочности/ и 2/ Изучение и создание полупроводниковых материалов». (Сохранён стиль оригинала).

Президиум Академии наук СССР своим Постановлением № 822 от 29 октября 1970 г. [11] утвердил основные направления деятельности всех научных учреждений Академии наук СССР, в том числе основные направления научной деятельности ИФМ АН СССР:

1. Электронная структура переходных металлов, их сплавов и соединений. Закономерности магнитных превращений и связь магнитных свойств с электронной структурой магнитоупорядочивающихся твёрдых тел. Теория реальных кристаллов.
2. Физика магнитных материалов и магнитных измерений. Электромагнитные методы неповреждающего контроля.
3. Структурные несовершенства и их роль в кристаллизации, фазовых превращениях, диффузии, пластической деформации и разрушении металлов и сплавов. Изыскание новых сплавов и методов упрочнения.
4. Исследование поведения сверхпроводников в переменных полях.
5. Исследование нефононных механизмов сверхпроводимости. Структурные исследования плёнок и слоисто-плёночных систем.
6. Полупроводники в сильных магнитных и электрических полях. Разработка новых методов определения параметров полупроводниковых материалов.

1971–1987: ИФМ УНЦ АН СССР

14 января 1971 г. Президиум АН СССР постановил [12]: «Организовать с 1 марта 1971 г. Уральский научный центр Академии наук СССР в г. Свердловске на базе научных учреждений Уральского филиала АН СССР, Института физики металлов и Института математики и механики АН СССР». Отныне аббревиатура названия Института выглядит как ИФМ УНЦ АН СССР.

Бюро Отделения общей физики и астрономии АН СССР, рассмотрев 26 февраля 1975 г. итоги деятельности Института физики

металлов за 1970–1974 г., постановляет [13]: «Рекомендовать Институту продолжать фундаментальные исследования по проблемам: теория твёрдого тела, физика прочности и пластичности, физика магнитных явлений, сверхпроводимость, физика полупроводников; шире развернуть исследования по проблеме образование и структура кристаллов».

Президиум Академии наук СССР своим Постановлением № 159 от 12 февраля 1976 г. утвердил следующие основные направления научных исследований Института физики металлов УНЦ АН СССР [14]:

1. Электронная структура переходных металлов, их сплавов и соединений; закономерности магнитных превращений и связь магнитных свойств с электронной и атомной структурой магнитоупорядоченных твёрдых тел; развитие теории реальных кристаллов.

2. Физика магнитных материалов, включая магнитные плёнки и магнитострикционные сплавы; физика магнитных измерений; магнитные и электромагнитные методы неповреждающего контроля качества промышленных изделий; магнитная нейтронография.

3. Структурные несовершенства и их роль в кристаллизации, фазовых превращениях, диффузии, пластической деформации и разрушении металлов и сплавов; изыскание новых сплавов и методов упрочнения; образование и структура кристаллов; влияние высокого давления на физические свойства металлов и сплавов; гидроэкструзия.

4. Исследование влияния структурной и химической микронеоднородности и радиационных дефектов, вызываемых нейтронным излучением, на критические температуры и токи сверхпроводников; изучение спиновых флуктуаций в сверхпроводящих сплавах; нейтронографическое изучение фононных спектров сверхпроводников в нормальном и сверхпроводящем состоянии.

5. Полупроводники в сильных магнитных и электрических полях; разработка новых методов определения параметров полупроводниковых материалов.

Постановлением № 619 от 30 сентября 1976 г. об организации в г. Ижевске отдела Института физики металлов Президиум Академии наук СССР постановил утвердить следующие основные направления научной деятельности Отдела Института физики металлов УНЦ АН СССР в г. Ижевске [15]:

1. Развитие методов и создание средств неразрушающего контроля материалов и готовых изделий.

2. Теоретические и экспериментальные исследования вопросов упрочнения металлов и сплавов при различных воздействиях на них (гидроэкструзия, фазовый наклёп, высоко- и низкотемпературная термохимическая обработка, текстурообразование и т.д.) с целью получения высокопрочных материалов и высокоэффективных способов обработки.

8 декабря 1977 г. Президиум АН СССР принял постановление об основных направлениях научной деятельности учреждений Уральского научного центра Академии наук СССР, согласно которому были определены основные направления научных исследований ИФМ УНЦ АН СССР [16]:

1. Электронная структура переходных и редкоземельных металлов, их сплавов и соединений, её связь с магнитными, сверхпроводящими и др. электронными свойствами; природа ферромагнетизма металлов и сплавов.

2. Физика магнитных материалов и магнитных измерений; разработка новых магнитно-жестких и магнитострикционных материалов; изучение природы электромагнитных потерь при перемагничивании и разработка рекомендаций по повышению качества электротехнических сталей; магнитные элементы памяти для ЭВМ; магнитные и электромагнитные методы неповреждающего контроля.

3. Физика прочности и пластичности; теория реальных кристаллов; структурные несовершенства и их роль в кристаллизации, фазовых превращениях, диффузии, пластической деформации и разрушении металлов и сплавов; изыскание новых сплавов и методов упрочнения; воздействие высоких давлений, магнитных полей, реакторного и др. облучений на прочностные, магнитные и сверхпроводящие свойства.

4. Полупроводники и полуметаллы в сильных магнитных и электрических полях, в том числе бесщелевые и узкозонные полупроводники и полупроводники с магнитным порядком; распространение электромагнитных волн СВЧ и инфракрасного диапазонов; новые методы определения параметров полупроводниковых материалов.

Бюро Отделения общей физики и астрономии Президиума АН СССР, рассмотрев итоги деятельности Института физики металлов за 1976–1979 г., 27 февраля 1980 г. постановило [17]: «Рекомендовать Институту продолжать фундаментальные исследования по проблемам: теория твёрдого тела, физика прочности и пластичности, образование и структура кристаллов, физика магнитных явлений, физика полупроводников, сверхпроводимость, неразрушающие физические методы контроля».

Распоряжением № 50 от 14 марта 1986 г. по Уральскому научному центру АН СССР в составе Института физики металлов был образован отдел электрофизики путём перевода из Института сильноточной электроники СО АН СССР. Отделу электрофизики ИФМ УНЦ АН СССР были определены следующие научные направления [18]:

1. Разработка источников электронных и ионных пучков и их воздействие на металлы и сплавы.

2. Физика взрыва металлов.

3. Импульсная энергетика с индуктивным накоплением энергии.

4. Лазерная физика.

10 июля 1986 г. Распоряжением по Уральскому научному центру АН СССР Михаил Николаевич Михеев был освобождён от обязанностей директора Института физики металлов УНЦ АН СССР по собственному желанию и на эту должность был назначен доктор технических наук Виталий Евгеньевич Щербинин.



Виталий Евгеньевич Щербинин

1987–2017: ИФМ УрО АН СССР – ИФМ УрО РАН

В 1987 г. было образовано Уральское отделение Академии наук и соответственно изменилось название института: Институт физики металлов Уральского отделения Академии наук СССР (ИФМ УрО АН СССР). После преобразования в 1991 г. АН СССР в Российскую академию наук институт стал именоваться как Институт физики металлов Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН).

По результатам комплексной проверки ИФМ УрО РАН Президиум Уральского отделения РАН в Постановлении от 19 сентября 1994 г. № 5-1 утвердил основные научные направления Института физики металлов [19]:

1. Электронная структура металлов, сплавов и соединений, её связь с физическими свойствами; природа магнетизма и сверхпроводимости металлов, сплавов и соединений.

2. Физика магнитных материалов и магнитных измерений.

3. Новые магнитные материалы, в том числе аморфные, нанокристаллические, многослойные; природа электрических потерь при размагничивании; магнитные и электромагнитные методы неповреждающего контроля.

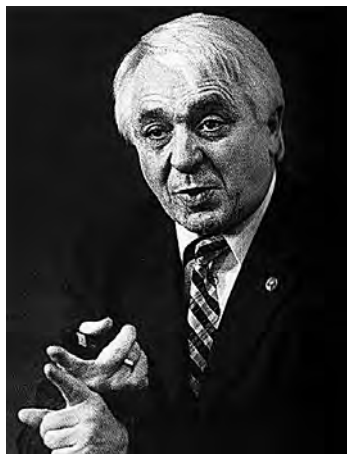
4. Физика прочности и пластичности, теория реальных кристаллов; структурные несовершенства и их роль в кристаллизации, фазовых превращениях, пластической деформации и разрушении материалов, сплавов, интерметаллидов; новые материалы и технологии; воздействие высоких давлений, магнитных полей, поверхностно-активных сред, реакторного и других облучений на прочностные, магнитные и сверхпроводящие свойства.

5. Полупроводники и полуметаллы в сильных магнитных и электрических полях; электромагнитные волны СВЧ и ИК диапазонов, приборы и устройства на их основе.

27 апреля 1998 г. Распоряжением по Уральскому отделению РАН Виталий Евгеньевич Щербинин был освобождён от занимаемой должности директора Института физики металлов УрО РАН по собственному желанию и на эту должность был назначен член-корреспондент РАН Владимир Васильевич Устинов, который занимает эту должность с 1 мая 1998 г. по настоящее время.

Постановлением Президиума УрО РАН от 7 декабря 2000 г. № 12-1 были утверждены следующие основные направлениями деятельности ИФМ УрО РАН [20]:

1. Электронные свойства металлов, полуметаллов, полупроводников, их сплавов, соединений и гетероструктур на их основе: взаимосвязь с атомным строением и кристаллической структурой, коллективные эффекты, в том числе сверхпроводимость и магнетизм, кинетические и резонансные явления в постоянных и переменных электрических и магнитных полях.



Владимир Васильевич Устинов

2. Физика магнитных материалов: природа формирования магнитного упорядочения, доменная структура и процессы перемагничивания, нелинейные явления; разработка новых магнитных материалов (магнитотвёрдых, магнитомягких, магнитострикционных, магниторезистивных и др.), приборов и систем на их основе, в том числе для медицинских целей; магнитные, электромагнитные и магнитоакустические методы неразрушающего контроля материалов и изделий.

3. Кристаллическое строение и физико-механические свойства конденсированных сред: структурные несовершенства и их роль в кристаллизации, твердофазных превращениях, пластической деформации и разрушении; влияние внешних воздействий (высокие давления, ударно-волновые нагрузки, излучения, интенсивные пластические деформации и др.) на фазовые и структурные превращения и физико-механические свойства; создание новых материалов и технологий, в т.ч. для медицинских целей; физика прочности и пластичности.

Президиум Российской академии наук своим Постановлением № 51 от 21 февраля 2006 г. постановил утвердить следующие основные направления научной деятельности Института физики металлов Уральского отделения Российской академии наук [21]:

1. Электронная структура, межэлектронные взаимодействия и физические свойства переходных, редкоземельных и актиноидных металлов, сплавов и соединений на их основе, низкоразмерных полупроводниковых систем.

2. Магнитные структуры, спиновый транспорт и методы направленной модификации физических свойств в функциональных магнитных материалах на основе металлических и полупроводниковых гетероструктур, интерметаллидов и металлических соединений в кристаллическом, наноструктурном и аморфном состояниях.

3. Физические основы диагностики сложных систем из металлических материалов и изделий с помощью электромагнитных и акустических полей, обеспечивающей техногенную и экологическую безопасность.

4. Дислокационные структуры, фазовые переходы и физико-механические свойства сталей и сплавов цветных и драгоценных металлов, интерметаллидов и композитов; разработка перспективных конструкционных материалов и способов их обработки для нужд техники и медицины.

5. Атомно-структурные превращения, нелинейные явления и неравновесные процессы в конденсированных средах при интенсивных радиационных, термических, деформационных и ударных воздействиях.

В этой формулировке научные направления института остаются неизменными последние 10 лет. Сначала они были утверждены в прежнем виде постановлением Президиума РАН от 24 июня 2008 г. № 446 [22]. Затем, после образования ФАНО России, эти же направления были закреплены Приказом ФАНО [23] в новом Уставе ИФМ УрО РАН, в соответствии с которым институт получил имя Михаила Николаевича Михеева и стал именоваться как Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.



Присвоение институту имени Михаила Николаевича Михеева – дань исторической справедливости. Именно благодаря работе Михаила Николаевича на посту директора Института физики металлов сегодня – крупнейший академический институт на Урале. Сохранение высокого уровня научных исследований в институте и дальнейшее его развитие стало возможным благодаря усилиям В.Е. Щербинина – преемника М.Н. Михеева на директорской должности, и автора этих строк, сменившего В.Е. Щербинина в 1998 г. В музее института на одной из стен висит дружеский шарж, на котором три директора ИФМ – два бывших и нынешний, изображены бурлаками, тянущими лямку – «корабль» ИФМ. Коренным в этой упряжке, несомненно, является М.Н. Михеев.

НАПРАВЛЕНИЯ

научных исследований Института
в названиях лабораторий –
от четырёх групп УралФТИ (1932)
до тридцати лабораторий ИФМ УрО РАН (2017)

Сложившаяся в институте с первых дней его существования традиция называть научные лаборатории в соответствии с главным направлением их деятельности позволяет проследить детали развития научной тематики института, исследуя трансформацию числа и названий лабораторий во времени. В этом разделе мы проведём такой анализ по годам с 1932 по 2017, выделяя только те годы, когда происходили существенные изменения структуры института. В тех случаях, когда в приказах о создании лабораторий имелась информация о назначении их руководителей, мы приведём также и имена новых заведующих лабораториями.

1932 год

Уральский физико-технический институт был организован в составе 4-х групп [24]:

1. Группа 1. Магнитные и электрические явления (Я.Г. Дорфман и И.К. Кикоин).
2. Группа 2. Изучение механизма фазовых превращений в сплавах (М.Г. Окнов).
3. Группа 3. Изучение пластической деформации металлов (М.В. Якутович).
4. Группа 4. Электронография (В.И. Архаров).

1934 год

В структуре УралФТИ появилось деление на отделы, лаборатории и сектора [25]:

1. Отдел изучения электрических свойств (И.К. Кикоин).
2. Отдел молекулярной физики металлов и изучения физических свойств жидких металлов (Я.Г. Дорфман).
3. Отдел магнитных явлений (Р.И. Янус).
4. Лаборатория Вассера (Вассер).

5. Сектор изучения механизма фазовых превращений (А.П. Комар).
6. Отдел изучения диффузии (В.С. Бугаков).
7. Отдел изучения механических свойств металлов (М.В. Якутович).
8. Тепловая лаборатория (Б.Г. Стрелков).
9. Отдел теоретической физики (С.П. Шубин).
10. Химическая лаборатория (Н.Е. Брежнева).

1936 год

На основании приказа Наркомтяжпрома СССР установлена следующая структура УралФТИ [26]:

1. Теоретическая группа (С.П. Шубин).
2. Лаборатория электрических явлений (И.К. Кикоин).
3. Лаборатория молекулярных явлений (Я.Г. Дорфман).
4. Лаборатория магнитных явлений (Р.И. Янус).
5. Лаборатория механических явлений (М.В. Якутович).
6. Лаборатория фазовых превращений (А.П. Комар).
7. Лаборатория кристаллизации (И.Н. Странский).
8. Лаборатория диффузии (В.С. Бугаков).
9. Лаборатория низких температур (Б.Г. Лазарев).
10. Лаборатория расплавленных солей (С.В. Карпачев).
11. Группа кинетики восстановления окислов железа (Г.И. Чуфаров).

Фигурирующая в этом списке лаборатория низких температур была создана в 1936 г. с первоначальным названием «лаборатория электропроводности металлов» [27].

Лаборатория Вассера, тепловая лаборатория и химическая лаборатория упразднены.

1937 год

Упразднен отдел общей электрохимии [28] (данные о создании упраздняемого отдела не сохранились).

На основании распоряжения по НКТП ликвидирована лаборатория низких температур [29].

В докладной записке временно исполняющего обязанности директора М.В. Якутовича указано, что УралФТИ имеет в своём составе [30]:

1. Лабораторию кинетики металлургических реакций.
2. Лабораторию электрохимии расплавленных солей.
3. Лабораторию рентгеноанализа и фазовых превращений.
4. Лабораторию диффузии металлов.
5. Лабораторию механических свойств.
6. Лабораторию магнитных явлений.
7. Лабораторию электрических явлений.
8. Теоретическую группу.

В этой структуре отсутствует лаборатория кристаллизации. Приказ о ликвидации лаборатории не сохранился. Существует

приказ об отчислении из института заведующего лабораторией И.Н. Странского [31]).

В структуре отсутствует также лаборатория молекулярных явлений. Приказа о ликвидации лаборатории молекулярных явлений нет. Существует приказ об освобождении от работы по собственному желанию заведующего лабораторией Я.Г. Дорфмана [32].

1939 год

В соответствии с утверждённым Техсоветом НКТП тематическим планом на 1939 г. установлена структура следующая УралФТИ [33]:

1. Лаборатория электрохимии расплавленных солей.
2. Лаборатория кинетики.
3. Лаборатория фазовых превращений.
4. Лаборатория диффузии.
5. Лаборатория механических свойств.
6. Лаборатория электрических явлений.
7. Лаборатория магнитных явлений.

В этой структуре отсутствует Теоретическая группа С.П. Шубина. В приказе по Урал ФТИ говорится, что теоретическая группа расформирована «в целях лучшей увязки деятельности физиков-теоретиков с работой экспериментаторов» [34].

В соответствии с приложением к постановлению Президиума АН СССР утверждена следующая структура Института металлургии, металлофизики и металлургии [35]:

1. Лаборатория металлургии.
2. Лаборатория механических свойств металлов (и испытательной стали).
3. Лаборатория фазовых превращений и рентгено-анализа.
4. Лаборатория электрических явлений.
5. Лаборатория магнитных свойств металлов.
6. Лаборатория металлургических процессов чёрной металлургии.
7. Лаборатория металлургических процессов цветной металлургии.

Переданы во вновь созданный Химический институт УФАИ СССР лаборатории электрохимии расплавленных солей и кинетики восстановления окислов железа.

В структуре института отсутствует лаборатория диффузии; приказ о её ликвидации не сохранился. Причина ликвидации указана в постановлении Техсовета НКТП по годовому отчету УФИ за 1938 г., в котором говорится, что тема «Изменение энергии разрыхления при переходе от самодиффузии к обычной диффузии» не выполнена [36].

1941 год

Вновь создана лаборатория диффузии, в должности заведующего утверждён В.И. Архаров [37].

1943 год

В соответствии с Положением об Институте металлофизики и металлургии УФАН СССР утверждена его следующая структура [38]:

1. Лаборатория металловедения.
2. Лаборатория диффузии.
3. Лаборатория фазовых превращений и рентгеноанализа.
4. Лаборатория механических свойств и испытаний металлов.
5. Лаборатория магнитных явлений.
6. Лаборатория технического электромагнетизма.
7. Лаборатория электрических явлений.
8. Лаборатория металлургических процессов чёрных металлов.
9. Лаборатория металлургических процессов цветных металлов.
10. Лаборатория поверхностных явлений.
11. Лаборатория оптики металлов.
12. Лаборатория рентгеноспектрального анализа.

1944 год

На основании решения Президиума АН СССР «разукрупнена» лаборатория магнитных явлений и на её основе созданы две лаборатории [39]:

- лаборатория технического электромагнетизма,
- лаборатория ферромагнетизма и магнитных материалов.

«Учитывая близость тематики и методов исследования», учёный совет Института металлофизики и металлургии принял решение объединить в единую лабораторию фазовых превращений и рентгеновского анализа лабораторию фазовых превращений и рентгеноструктурного анализа и лабораторию рентгено-спектрального анализа [40].

1945 год

На заседании Президиума УФАН СССР по предложению академика И.П. Бардина принято решение [41] о передаче в состав Химического института лабораторий металлургических процессов черных металлов и металлургических процессов цветных металлов.

1946 год

В соответствии с решением Президиума УФАН СССР организован отдел теоретической физики [42]. Заведующим отделом назначен С.В. Вонсовский.

1949 год

На основании решения Президиума АН СССР создана лаборатория высоких давлений. Заведующим лабораторией назначен Н.А. Смирнов [43].

На основании распоряжения Президиума УФАН СССР объединены в лабораторию ферромагнетизма лаборатории технического электромагнетизма и ферромагнетизма [44]. Заведование лабораторией возложено на Я.С. Шура.

1950 год

На основании распоряжения Президиума УФАН СССР лаборатории металловедения и диффузии объединены в лабораторию физического металловедения [45]. Заведующим лабораторией назначен В.И. Архаров.

1951 год

На основании постановления Президиума УФАН СССР в ИФМ из Института химии и металлургии переведена лаборатория прецизионных сплавов [46], заведующим лабораторией назначен Г.В. Гайдуков.

1952 год

С 31 декабря из лаборатории магнитных явлений выделена группа магнитной дефектоскопии и в соответствии с утверждённой структурой с 1 января 1953 г. организована лаборатория магнитной дефектоскопии [47]. Исполняющим обязанности заведующего лабораторией назначен М.Н. Михеев.

1953 год

В соответствии с постановлением Президиума АН СССР приказом по ИФМ [48] утверждена следующая структура Института:

1. Отдел теоретической физики.
2. Лаборатория физических основ лучевой дефектоскопии.
3. Лаборатория механических свойств металлов.
4. Лаборатория магнитных материалов.
5. Лаборатория физического металловедения (с группами прецизионных сплавов и электронной микроскопии).
6. Лаборатория оптики металлов и спектроскопии.
7. Лаборатория магнитного анализа и дефектоскопии.
8. Лаборатория технического электромагнетизма.
9. Лаборатория диффузии (с группой рентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализа).
10. Лаборатория высоких давлений.

Этим приказом из структуры была исключена лаборатория электрических явлений и создана лаборатория физических основ лучевой дефектоскопии. И.Г. Факидов был освобождён от должности заведующего лабораторией электрических явлений и на-

значен заведующим лабораторией физических основ лучевой дефектоскопии. Этим же приказом была исключена из структуры лаборатория фазовых превращений.

1954 год

В соответствии с постановлением Президиума АН СССР «организована» (*фактически воссоздана*) лаборатория низких температур [49]. Проведение работы по организации лаборатории и подготовки тематики возложено на Н.В. Волкенштейна.

1956 год

В соответствии с решением Президиума УФАН СССР организованы [50]:

- лаборатория фазовых превращений (исполняющим обязанности заведующего лабораторией назначен Н.Н. Буйнов);
- лаборатория рентгеновского спектрального анализа (исполняющим обязанности заведующего лабораторией назначен С.А. Немнонов).

1957 год

В соответствии с решением Президиума УФАН СССР приказом М.Н. Михеева [51] «организована» (*фактически воссоздана*) лаборатория электрических явлений. Заведующим лабораторией назначен И.Г. Факидов.

Этим же приказом создана лаборатория изучения взаимодействия жёстких ядерных излучений с веществом, заведующим которой назначен А.К. Кикоин. Справедливости ради необходимо заметить, что в тексте приказа говорится не о создании новой лаборатории, а о переименовании некой лаборатории №1, которая не была включена когда-либо в структуру Института.

1959 год

Постановлением Президиума АН СССР утверждена следующая структура ИФМ АН СССР [52]:

1. Отдел теоретической физики.
2. Лаборатория диффузии.
3. Лаборатория ферромагнетизма.
4. Лаборатория магнитного структурного анализа.
5. Лаборатория физического металловедения.
6. Лаборатория фазовых превращений.
7. Лаборатория механических свойств.
8. Лаборатория электрических явлений.
9. Лаборатория рентгеновской спектроскопии.
10. Лаборатория высоких давлений.
11. Лаборатория оптики металлов и спектроскопии.
12. Лаборатория технического электромагнетизма.

13. Лаборатория излучений.
14. Лаборатория низких температур.

1963 год

В соответствии с постановлением Президиума АН СССР созданы [53]:

- лаборатория нейтронографии;
- лаборатория полупроводников и полуметаллов;
- отдел прецизионных сплавов и монокристаллов.

1964 год

Создана группа электроники и группа вычислительной математики при отделе теоретической физики [54].

1968 год

В связи с развитием в ИФМ АН СССР исследований по разработке новых методов повышения служебных свойств современных сталей и сплавов и изучению устойчивости упрочнённых состояний создана лаборатория новых методов упрочнения [55]. Заведующим лабораторией назначен Е.Н. Соколов (в 1970 г. лаборатория преобразована в группу).

1969 год

В связи с развитием в ИФМ АН СССР как теоретических, так и экспериментальных исследований по кинетическим явлениям в проводниках создана лаборатория кинетических явлений [56], её заведующим назначен П.С. Зырянов.

В соответствии с утверждённой структурой Президиумом АН СССР организован отдел радиационной физики твёрдого тела в составе [57]:

- лаборатория магнитной нейтронографии;
- лаборатория излучений;
- научно-технический отдел работ на атомном реакторе.

Заведующим отделом назначен С.К. Сидоров.

Приказом по институту [58] лаборатория излучений и группа диффузии радиоактивных индикаторов объединены в лабораторию диффузии отдела радиационной физики твёрдого тела. Исполняющим обязанности заведующего лабораторией назначен С.М. Клоцман. Существовавшая в институте до этого момента лаборатория диффузии переименована в лабораторию кристаллизации.

В соответствии с утверждённым постановлением Президиума АН СССР структурой лаборатория высоких давлений реорганизована в отдел физики высоких давлений в составе лабораторий высоких давлений и гидроэкструзии [59]. Заведующим отделом назначен К.П. Родионов.

1970 год

В соответствии с утверждённым постановлением Президиума АН СССР структурой реорганизована лаборатория электромагнетизма [60]: из неё выделена лаборатория дефектоскопии. Исполняющим обязанности заведующего лабораторией назначен Н.Н. Зацепин.

1971 год

На основании письма Президиума АН СССР научно-технический отдел работ на атомном реакторе переименован в отдел работ на атомном реакторе [61].

В соответствии с решением Учёного совета ИФМ в составе отдела теоретической физики создана лаборатория математических методов [62].

1972 год

В соответствии с утверждённым Президиумом АН СССР структурой создана лаборатория магнитных полупроводников [63]. Исполняющим обязанности заведующего лабораторией назначен А.А. Самохвалов.

1974 год

«В связи с развитием теоретических исследований по темам, выполняемым с использованием реактора ИВВ-2», в составе отдела радиационной физики твёрдого тела создана лаборатория теории твёрдого тела [64]. Исполнение обязанностей заведующего лабораторией возложено на Ю.А. Изюмова.

1976 год

В соответствии с постановлением Президиума АН СССР в г. Ижевске создан отдел ИФМ в составе [65]:

- лаборатория теории металлов;
- лаборатория неразрушающего контроля;
- лаборатория прочности;
- лаборатория электронных свойств.

Исполнение обязанностей заведующего отделом возложено на Г.С. Корзунина.

1977 год

«В целях развития метода электронной спектроскопии и автоматизации спектральных исследований» создана группа новых спектральных методов в составе лаборатории рентгеновской спектроскопии [66]. Руководителем группы назначен О.Б. Соколов.

«Для проведения фундаментальных исследований и технологических разработок в области физики и техники высоких давлений» создана группа гидроэкструзии [67] при Ижевском отделе.

В соответствии со структурой отдел работ на атомном реакторе переименован в лабораторию радиационной физики и нейтронной спектроскопии [68].

1978 год

«В целях повышения уровня НИР по использованию высокого гидростатического давления для технологических процессов и ускорения внедрения в производство гидроэкструзии металлов и других материалов» лаборатория гидроэкструзии преобразована в отдел гидроэкструзии в составе [69]:

- лаборатория физики деформации под давлением;
- группа новых технологических процессов металлообработки под высоким давлением;
- группа синтеза полупроводниковых материалов под давлением.

На должность заведующего отделом гидроэкструзии ИФМ переведён член-корреспондент АН УССР Б.И. Береснев. Исполнение обязанностей заведующего лабораторией физики деформации под давлением возложено на В.Т. Шматова.

В Ижевском отделе группа гидроэкструзии преобразована в лабораторию гидроэкструзии. Исполнение обязанностей заведующего лабораторией гидроэкструзии Ижевского отдела возложено на А.Т. Гайворонского.

1979 год

В соответствии со штатным расписанием института директором утверждена следующая структура института [70]:

1. Отдел теоретической физики.
2. Отдел прецизионных сплавов.
3. Лаборатория физического металловедения.
4. Лаборатория механических свойств.
5. Лаборатория ферромагнетизма.
6. Лаборатория электромагнетизма.
7. Лаборатория дефектоскопии.
8. Лаборатория магнитного структурного анализа.
9. Лаборатория электрических явлений.
10. Лаборатория рентгеноспектроскопии.
11. Лаборатория оптики металлов.
12. Лаборатория кинетических явлений.
13. Лаборатория низких температур.
14. Лаборатория полупроводников и полуметаллов.
15. Лаборатория магнитных полупроводников.
16. Лаборатория математических методов.
17. Лаборатория высоких давлений.
18. Группа электроники.
19. Отдел метрологии.

А. Отдел радиационной физики твёрдого тела.

20. Лаборатория теории твёрдого тела.
21. Лаборатория магнитной нейтронографии.
22. Лаборатория радиационной физики и нейтронной спектроскопии.
23. Лаборатория диффузии.
- Б. Отдел гидроэкструзии.
24. Лаборатория физики деформации под давлением.
25. Группа новых технологических процессов металлообработки под высоким давлением.
26. Группа синтеза полупроводниковых материалов под давлением.
- В. Ижевский отдел (г. Ижевск).
27. Лаборатория теории металлов.
28. Лаборатория электронных свойств.
29. Лаборатория прочности.
30. Лаборатория неразрушающего контроля.
31. Лаборатория гидроэкструзии.
32. Группа магнитных методов контроля.

Из лаборатории рентгеновской спектроскопии выделена группа новых спектральных методов [71]. Руководитель группы – О.Б. Соколов.

1980 год

В составе Ижевского отдела на базе группы магнитных методов контроля создана лаборатория магнитной структуроскопии [72]. Исполнение обязанностей заведующего лабораторией возложено на Э.С. Горкунова.

1982 год

«В целях совершенствования НИР и повышения эффективности научных исследований с использованием высоких давлений» отдел гидроэкструзии преобразован в отдел высоких давлений в составе [73]:

- лаборатория физики деформации;
- группа гидростатической обработки;
- группа синтеза материалов;
- мастерская по изготовлению аппаратуры высокого давления;
- конструкторская группа.

Заведующим отделом назначен Г.Г. Талуц.

На основании решения Учёного совета лаборатория высоких давлений преобразована в группу магнитных превращений [74]. Обязанности руководителя группы возложены на Н.П. Гражданкину.

«В целях совершенствования структуры института» создан отдел прочности и пластичности в составе [75]:

- лаборатория физического металловедения;
- лаборатория механических свойств;
- лаборатория фазовых превращений.

Заведующим отделом назначен В.Д. Садовский. Исполнение обязанностей заведующего лабораторией физического металловедения возложено на В.М. Счастливецва.

1983 год

В соответствии с распоряжением Совета Министров СССР на базе отдела ИФМ организован Ижевский Физико-технический институт [76].

1986 год

Созданы [77]:

Отдел неразрушающего контроля в составе:

- лаборатория магнитного структурного анализа;
- лаборатория дефектоскопии;
- лаборатория электромагнетизма;
- группа электроники.

Отдел электронных свойств в составе:

- лаборатория низких температур;
- лаборатория кинетических явлений.

Заведующим отделом неразрушающего контроля назначен В.Е. Щербинин. Заведующим отделом электронных свойств назначен В.Е. Старцев.

Лаборатория ферромагнетизма преобразована в отдел ферромагнетизма [78] в составе:

- лаборатория ферромагнитных сплавов (зав. лаб. А.С. Ермоленко);
- лаборатория магнитомягких материалов (зав. лаб. Б.К. Соколов);
- лаборатория прикладного магнетизма (зав. лаб. А.Е. Ермаков).

Заведующим отделом назначен С.В. Вонсовский.

Исключены из структуры [78]:

- отдел радиационной физики твёрдого тела,
- лаборатория физики деформации.

В соответствии с распоряжением Президиума УНЦ АН СССР [79] в структуру института введён отдел электрофизики (переведён из Института сильноточной электроники СО АН СССР). Заведующим отделом назначен Г.А. Месяц.

В соответствии с постановлением Президиума АН СССР [80] отдел электрофизики исключен из структуры ИФМ (на его базе создан Институт электрофизики УНЦ АН СССР).

1987 год

Созданы [81]:

Отдел прецизионной металлургии (на базе отдела прецизионных сплавов и монокристаллов и лаборатории кристаллизации) в составе:

- лаборатория прецизионных сплавов;
- лаборатория интерметаллических соединений и монокристаллов;
- лаборатория кристаллизации;
- химико-аналитическая группа.

Отдел диффузионных явлений (на базе лаборатории диффузии и группы новых спектральных методов) в составе:

- лаборатория диффузии;
- лаборатория физики плёнок и покрытий;
- лаборатория радиационных дефектов;
- лаборатория электронной спектроскопии.

1988 год

Созданы [82]:

Отдел математической и теоретической физики (на базе лаборатории теории твёрдого тела) в составе:

- лаборатория теории твёрдого тела;
- лаборатория вычислительных и математических методов.

Отдел теоретической физики в составе:

- лаборатория теории переходных металлов;
- лаборатория теоретической магнетофизики;
- лаборатория магнитной информатики;
- лаборатория теории прочности.

Создана лаборатория физико-химической механики [83] в составе отдела прочности и пластичности.

1989 год

Создан Отдел работ на атомном реакторе (на базе лабораторий магнитной нейтронографии и радиационной физики и нейтронной спектроскопии) [84] в составе:

- лаборатория магнитной нейтронографии;
- лаборатория радиационной физики и нейтронной спектроскопии;
- лаборатория облучений и нейтронной дифракции.

Из состава отдела неразрушающего контроля исключена группа электроники [85].

1990 год

При институте создан Инженерный центр физического приборостроения [86].

1993 год

В соответствии с решениями Ученого совета ликвидировано деление отдела математической и теоретической физики на лаборатории [87].

1995 год

Лаборатория облучений и нейтронной дифракции ОРАР преобразована в группу облучений [88]. Руководство группой возложено на В.Д. Пархоменко.

1996 год

Исключены из структуры отделы [89]:

- теоретической физики;
- ферромагнетизма;
- физики прочности и пластичности.

Создана лаборатория теоретической физики на базе лабораторий теоретической магнетофизики и теории переходных металлов. Исполняющим обязанности заведующего лабораторией назначен М.И. Куркин.

1997 год

Во исполнение решения Ученого совета из структуры института исключена лаборатория физико-химической механики [90].

В состав отдела электронных свойств включены лаборатории:

- электрических явлений [91];
- полупроводников и полуметаллов [92].

Заведующим отделом электронных свойств назначен В.В. Устинов.

В составе отдела неразрушающего контроля создана лаборатория акустических методов [93].

1998 год

В отделе высоких давлений созданы [94]:

- лаборатория физики высоких давлений (исполняющим обязанности заведующего лабораторией назначен Г.Г. Талуц);
- лаборатория нелинейной механики (исполняющим обязанности заведующего лабораторией назначен А.Б. Борисов).

В отделе математической и теоретической физики созданы [95]:

- лаборатория теории твёрдого тела (заведующим лабораторией назначен Ю.А. Изюмов);
- лаборатория квантовой теории металлов (исполняющим обязанности заведующего лабораторией назначен М.И. Кацнельсон).

2000 год

Создан [96] Отдел физики металлических наноструктур в составе:

- лаборатория электрических явлений;
- лаборатория диффузии;
- лаборатория электронной спектроскопии.

Заведующим отделом назначен В.В. Устинов.

Из структуры исключены отделы:

- высоких давлений;
- диффузионных явлений;
- электронных свойств.

2001 год

Из структуры отдела физики металлических наноструктур исключена лаборатория электронной спектроскопии [97].

На базе лабораторий магнитомягких материалов и магнитной информатики создана лаборатория микромагнетизма [98]. Исполняющим обязанности заведующего лабораторией назначен Б.Н. Филиппов.

2003 год

В соответствии с постановлением Учёного совета в отделе математической и теоретической физики упразднены [99]:

- лаборатория теории твёрдого тела;
- лаборатория квантовой теории металлов.

2005 год

Созданы [100]:

Отдел материаловедения в составе:

- лаборатория физического металловедения;
- лаборатория цветных сплавов (на базе лаборатории фазовых превращений и части лаборатории кристаллизации).

Отдел теоретической и математической физики (на базе отдела математической и теоретической физики и лаборатории теоретической физики).

Лаборатория нейтронных исследований вещества (на базе лаборатории радиационной физики и нейтронной спектроскопии и лаборатории магнитной нейтронографии).

Лаборатория неравновесных процессов и структур (на базе лаборатории радиационных дефектов и лаборатории физики плёнок и покрытий).

Исключены из структуры института:

1. отдел математической и теоретической физики;
2. лаборатория теоретической физики;
3. лаборатория кристаллизации;
4. лаборатория магнитной нейтронографии;
5. лаборатория радиационной физики и нейтронной спектроскопии;
6. лаборатория радиационных дефектов;
7. лаборатория фазовых превращений;
8. лаборатория физики плёнок и покрытий.

2006 год

Установлена следующая структура научных подразделений института.

Отдел материаловедения в составе:

- лаборатория физического металловедения;
- лаборатория цветных сплавов.

Отдел неразрушающего контроля в составе:

- лаборатория дефектоскопии;
- лаборатория магнитного структурного анализа;
- лаборатория электромагнетизма;
- лаборатория акустических методов.

Отдел прецизионной металлургии в составе:

- лаборатория интерметаллидов и монокристаллов;
- лаборатория прецизионных сплавов;
- химико-аналитический центр;
- участок прецизионной металлургии.

Отдел работ на атомном реакторе в составе:

- лаборатория нейтронных исследований вещества;
- группа облучений;
- группа высоких давлений;
- служба ядерно-физической электроники и автоматизации.

Отдел теоретической и математической физики

Отдел физики металлических наноструктур в составе:

- лаборатория электрических явлений;
- лаборатория диффузии.

Лаборатория кинетических явлений.

Лаборатория магнитных полупроводников.

Лаборатория механических свойств.

Лаборатория микромагнетизма.

Лаборатория нелинейной механики.

Лаборатория неравновесных процессов и структур.

Лаборатория низких температур.

Лаборатория оптики металлов.

Лаборатория полупроводников и полуметаллов.

Лаборатория прикладного магнетизма.

Лаборатория рентгеновской спектроскопии.

Лаборатория теории прочности.

Лаборатория ферромагнитных сплавов .

Лаборатория физики высоких давлений.

Совместная лаборатория медицинских материалов и криотехнологий.

2007 год

Лаборатория электромагнетизма преобразована в лабораторию комплексных методов контроля и группу термомагнитной обработки [101] в составе отдела неразрушающего контроля.

Создана группа электронной спектроскопии [102] в составе отдела физики металлических наноструктур.

2008 год

Введена следующая структура института в части научных подразделений [103]:

Отдел магнитных материалов в составе:

- лаборатория микромагнетизма;
- лаборатория прикладного магнетизма;
- лаборатория ферромагнитных сплавов.

Отдел материаловедения в составе:

- лаборатория механических свойств;
- лаборатория физического металловедения;
- лаборатория цветных сплавов.

Отдел наноспинтроники в составе:

- лаборатория диффузии,
- лаборатория кинетических явлений;
- лаборатория магнитных полупроводников;
- лаборатория электрических явлений;
- лаборатория электронной спектроскопии.

Отдел неразрушающего контроля в составе:

- лаборатория акустических методов;
- лаборатория дефектоскопии;
- лаборатория комплексных методов контроля;
- лаборатория магнитного структурного анализа;
- лаборатория термомагнитной обработки.

Отдел прецизионной металлургии в составе:

- лаборатория интерметаллидов и монокристаллов;
- лаборатория прецизионных сплавов;
- сектор синтеза сплавов и монокристаллов.

Отдел работ на атомном реакторе в составе:

- группа высоких давлений;
- группа облучений;
- лаборатория нейтронных исследований вещества;
- сектор ядерно-физической электроники и автоматизации.

Отдел теоретической и математической физики в составе:

- лаборатория теоретической физики;
- лаборатория теории нелинейных явлений;

Отдел физики деформации в составе:

- лаборатория прочности;
- лаборатория физики высоких давлений.

Отдел физики низких температур в составе:

- лаборатория медицинских материалов и криотехнологий (совместная лаборатория с Уральской государственной медицинской академией);
- лаборатория неравновесных процессов и структур;
- лаборатория низких температур.

Отдел электронных свойств в составе:

- лаборатория оптики металлов;
- лаборатория полупроводников и полуметаллов;
- лаборатория рентгеновской спектроскопии.

2009 год

Создана лаборатория прецизионных сплавов и интерметаллидов [104] в отделе прецизионной металлургии (на базе лаборатории интерметаллидов и монокристаллов и лаборатории прецизионных сплавов путём их объединения).

2011 год

Создана лаборатория квантовой теории конденсированного состояния [105] в составе отдела теоретической и математической физики.

2012 год

«В целях консолидации работы лабораторий института по темам «Импульс» и «Спин» и во исполнение решения Учёного совета»:

создан отдел исследований вещества при экстремальных воздействиях [106], в состав которого вошли:

- лаборатория нейтронных исследований вещества;
- лаборатория неравновесных процессов и структур;
- лаборатория электронных свойств вещества при высоких давлениях;

реструктурирован отдел физики низких температур:

- лаборатория неравновесных процессов и структур переведена в полном составе во вновь созданный отдел исследований вещества при экстремальных воздействиях;
- лаборатория медицинских материалов и криотехнологий присоединена к лаборатории низких температур;
- лаборатория низких температур переведена в отдел наноспинтроники в полном составе;
- отдел физики низких температур исключён из структуры института;

реструктурирован отдел работ на атомном реакторе:

- группа облучений и сектор ядерно-физической электроники и автоматизации включены в полном составе в лабораторию нейтронных исследований вещества;
- создан в качестве обособленного подразделения ИФМ УрО РАН в г. Заречном отдел работ на атомном реакторе (ОРАР) в качестве структурного подразделения лаборатории нейтронных исследований вещества;
- отдел работ на атомном реакторе исключён из числа самостоятельных научных отделов ИФМ УрО РАН с сохранением этого названия (ОРАР) за обособленным

структурным подразделением лаборатории нейтронных исследований вещества;

- группа высоких давлений преобразована в лабораторию электронных свойств вещества при высоких давлениях в составе отдела исследований вещества при экстремальных воздействиях.

2013 год

В целях консолидации работ лабораторий института по теме «Спин», концентрации усилий на перспективных научных направлениях и во исполнение решения Учёного совета приказом по ИФМ [107]:

- лаборатория акустических методов выведена из состава отдела неразрушающего контроля, включена в состав отдела наноспинтроники и переименована в лабораторию углеродных наноматериалов;
- лаборатория электронной спектроскопии переименована в лабораторию нанокompозитных мультиферроиков,
- лаборатория неравновесных процессов и структур отдела исследований вещества при экстремальных воздействиях исключена из структуры института.

2014 год

В связи с признанием института победителем конкурса на получение грантов Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих учёных в российских научных учреждениях, и выделением институту со стороны Минобрнауки гранта в размере 88,4 млн. руб. на обеспечение создания и работы в институте новой лаборатории под руководством ведущего учёного Демокритова С.О., в ИФМ создана лаборатория квантовой наноспинтроники [108] в составе отдела наноспинтроники [109].

Исключена из структуры института лаборатория электронных свойств вещества при высоких давлениях [110] отдела исследований вещества при экстремальных воздействиях.

2015 год

Отдел исследований вещества при экстремальных воздействиях переименован в отдел радиационной физики и нейтронной спектроскопии. Объединены отдел прецизионной металлургии и отдел физики деформации. Объединённый отдел назван отделом прецизионной металлургии и технологий обработки давлением [111].

2016 год

В целях обеспечения проведения совместных с Уральским федеральным университетом научных исследований в области

магнетизма и функциональных магнитных наноматериалов, с целью повышения научного потенциала и международной конкурентоспособности УрФУ и ИФМ УрО РАН создана совместная лаборатория магнетизма и магнитных наноструктур [112].

2017 год

Директором утверждена следующая структура научных подразделений ИФМ УрО РАН [113]:

Отдел магнитных материалов:

- лаборатория микромагнетизма;
- лаборатория прикладного магнетизма;
- лаборатория ферромагнитных сплавов.

Отдел материаловедения:

- лаборатория механических свойств;
- лаборатория физического металловедения;
- лаборатория цветных сплавов.

Отдел наноспинтроники:

- лаборатория диффузии;
- лаборатория квантовой наноспинтроники;
- лаборатория кинетических явлений;
- лаборатория магнитных полупроводников;
- лаборатория нанокompозитных мультиферроиков;
- лаборатория низких температур;
- лаборатория углеродных наноматериалов;
- лаборатория электрических явлений.

Отдел неразрушающего контроля:

- лаборатория дефектоскопии;
- лаборатория комплексных методов контроля;
- лаборатория магнитного структурного анализа;
- лаборатория термомагнитной обработки.

Отдел прецизионной металлургии и технологий обработки давлением:

- лаборатория прецизионных сплавов и интерметаллидов,
- лаборатория прочности;
- лаборатория физики высоких давлений;
- сектор синтеза сплавов и монокристаллов.

Отдел радиационной физики и нейтронной спектроскопии:

- лаборатория нейтронных исследований вещества;
- обособленное подразделение «Отдел работ на атомном реакторе» (ОРАР).

Отдел теоретической и математической физики:

- лаборатория квантовой теории конденсированного состояния;
- лаборатория теоретической физики;
- лаборатория теории нелинейных явлений.

Отдел электронных свойств:

- лаборатория оптики металлов;

- лаборатория полупроводников и полуметаллов;
- лаборатория рентгеновской спектроскопии.

На этом заканчивается изложение истории научных направлений лабораторий института, отражаемых в названиях лабораторий. Что касается фамилий руководителей упомянутых лабораторий, то следует заметить, что автор старался указать, как правило, только фамилии руководителей лабораторий на момент их создания и не ставил перед собой задачи упомянуть в настоящей статье фамилии всех руководителей каждой из лабораторий института. Эта задача была поставлена перед действующими сегодня заведующими лабораториями, которые представят детализированную историю своих лабораторий в последующих главах этой книги.

В заключение хочу выразить глубокую благодарность Вере Павловне Спириной, руководителю научно-архивного отдела института, благодаря которой каждый шаг в истории научных направлений института и его лабораторий получил документальное подтверждение в нижеприведённом списке 113 архивных документов.

В.В. Устинов

Список архивных документов

- [1] Приказ заместителя директора УралФТИ Я.Г. Дорфмана от 26 января 1932 г. № 1. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 1. Л. 1–2. Подлинник.
- [2] Докладная записка временно исполняющего обязанности директора М.В. Якутовича председателю Техсовета НКТП 1937 г. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 13. Л. 1–7. Подлинник.
- [3] Протокол заседания Президиума АН СССР от 16 июня 1939 г. № 19. Архив РАН. Ф. 2. Оп. 6а. Д. 18. Л. 122, 129–133, 150. Копия.
- [4] Отчёт о работе ИМММ за 1-е полугодие 1941 г. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 26. Л. 1–5. Подлинник.
- [5] Положение об Институте металлофизики и металлургии Уральского филиала Академии наук СССР от 16 сентября 1943 г. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 28. Л. 1–6. Подлинник.
- [6] Протокол заседания Президиума Уральского филиала АН СССР от 26 июля 1945 г. № 7. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 1. Оп. 1. Д. 74. Л. 15–16. Подлинник.
- [7] Отчёт директора М.Н. Михеева о работе ИФМ за 1945 г. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 1. Оп. 1. Д. 70. Л. 59–60, 88–92, 96–97. Подлинник.
- [8] Постановление Президиума АН СССР от 26 апреля 1957 г. № 359. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. СИФ. Д. 46. Л. 237–242. Копия.
- [9] Постановление Президиума АН СССР от 14 марта 1958 г. № 184. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. СИФ. Д. 50. Л. 183–184. Копия.

- [10] Выписка из протокола заседания Бюро Отделения физико-математических наук АН СССР от 2 марта 1960 г. № 4. Научный архив ИФМ УрО РАН. СИФ, 1960 г. Д. 2. Л. 205–206. Копия.
- [11] Постановление Президиума АН СССР от 29 октября 1970 г. № 822. Научный архив ИФМ УрО РАН. СИФ, 1971 г. Д. 1. Л. 80, 81, 84, 87. Копия.
- [12] Постановление Президиума АН СССР от 14 января 1971 г. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. СИФ. Д. 97. Л. 26–34. Копия.
- [13] Постановление Бюро Отделения общей физики и астрономии Президиума АН СССР от 26 февраля 1975 г. Научный архив ИФМ УрО РАН. СИФ, 1975, Д. 1, Л. 90–92. Копия.
- [14] Постановление Президиума АН СССР от 12 февраля 1976 г. № 159. Научный архив ИФМ УрО РАН. СИФ, 1976 г. Д. 1. Л. 112–117. Копия.
- [15] Постановление Президиума АН СССР от 30 сентября 1976 г. № 619. Научный архив ИФМ УрО РАН. СИФ, 1976, Д. 2. Л. 10. Копия.
- [16] Постановление Президиума АН СССР от 8 декабря 1977 г. № 1259. Научный архив ИФМ УрО РАН. СИФ, 1977, Д. 1. Л. 249–250. Копия.
- [17] Постановление Бюро Отделения общей физики и астрономии Президиума АН СССР от 27 февраля 1980 г. Научный архив ИФМ УрО РАН. СИФ, 1980 г. Д. 1. Л. 11–13. Копия.
- [18] Распоряжение УНЦ АН СССР от 14 марта 1986 г. № 50. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 14. Оп. 1. Д. 499. Л. 85. Подлинник.
- [19] Постановление Президиума УрО РАН от 19 сентября 1994 г. № 5–1. Научный архив ИФМ УрО РАН. СИФ. 1994 г. Д. 1224. Т. 2. Л. 94–95. Копия.
- [20] Постановление Президиума УрО РАН от 7 декабря 2000 г. № 12–1. Научный архив ИФМ УрО РАН. СИФ. 2000 г. Д. 1224. Т. 3. Л. 170–172. Копия.
- [21] Постановление Президиума РАН от 21 февраля 2006 г. № 51. Научный архив ИФМ УрО РАН. СИФ. 2006 г. Д. 1224. Т. 1. Л. 6. Копия.
- [22] Постановление Президиума РАН от 24 июня 2008 г. № 446. Научный архив ИФМ УрО РАН. СИФ. 2008 г. Д. 1224. Т. 1. Л. 61. Копия.
- [23] Приказ ФАНО России от 15 октября 2014 г. № 819. Общий отдел ИФМ УрО РАН. 2014 г. Д. 1312.
- [24] Приказ заместителя директора УралФТИ Я.Г. Дорфмана от 26 января 1932 г. № 1. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 1. Л. 1–2. Подлинник.
- [25] Приказ директора УралФТИ М.Н. Михеева от 01 января 1934 г. № 2. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 2. Л. 2–5. Подлинник.
- [26] Приказ директора УралФТИ М.Н. Михеева от 28 ноября 1936 г. № 154. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 6. Л. 65. Подлинник.
- [27] Приказ директора УралФТИ М.Н. Михеева от 19 июля 1936 г. № 83. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 6. Л. 36, 36 об. Подлинник.
- [28] Приказ и.о. директора УралФТИ Я.Г. Дорфмана от 02 января 1937 г. № 2. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 9. Л. 1 об. Подлинник.

- [29] Приказ директора УралФТИ М.Н. Михеева от 8 октября 1937 г. № 154. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 9. Л. 79, 79об. Подлинник.
- [30] Докладная записка временно исполняющего обязанности директора М.В. Якутовича председателю Техсовета НКТП. 1937 г. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 13. Л. 1–7. Подлинник
- [31] Приказ и.о. директора УралФТИ Я.Г. Дорфмана от 04 апреля 1937 г. № 49. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 9. Л. 22 об. Подлинник
- [32] Приказ вр.и.о. директора УралФТИ М.Я. Оглоблина от 17 января 1938 г. № 12. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 2. Д. 9. Л. 104. Подлинник
- [33] Приказ директора УралФТИ А.М. Сорокина от 9 января 1939 г. № 9. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 17. Л. 82–83. Подлинник.
- [34] Приказ директора УралФТИ А.М. Сорокина от 29 января 1939 г. № 22. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 17. Л. 97–98. Подлинник
- [35] Приложение к Постановлению Президиума АН СССР от 16 июня 1939 г. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. СИФ. Д. 16. Л. 119. Копия.
- [36] Приказ директора УралФТИ А.М. Сорокина от 28 марта 1939 г. № 71. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 17. Л. 128–130. Подлинник.
- [37] Выписка из протокола Президиума АН СССР от 10 марта 1941 г. Научный архив ИФМ УрО РАН. Оп. 32. Д. 1. Л. 149.
- [38] Положение об Институте металлофизики и металлургии Уральского филиала Академии наук СССР от 16 сентября 1943 г. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 28. Л. 1–6. Подлинник.
- [39] Выписка из протокола № 6 заседания Президиума Академии наук СССР от 21–22 декабря 1943 г. Архив РАН. Ф. 2. Оп. 6а. Д. 40. Л. 67–68, 93, 94. Копия.
- [40] Протокол ученого совета Института металлофизики и металлургии от 10 октября 1944 г. № 3. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 32. Л. 7–8. Подлинник.
- [41] Протокол заседания Президиума Уральского филиала АН СССР от 26 июля 1945 г. № 7. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 1. Оп. 1. Д. 74. Л. 15–16. Подлинник.
- [42] Приказ директора ИФМ УФАН М.Н. Михеева от 02 апреля 1946 г. № 22. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф.2. Оп. 1. Д. 36. Л. 12. Подлинник.
- [43] Приказ зам. директора ИФМ УФАН В.Д. Садовского от 01 ноября 1949 г. № 36-к. Научный архив ИФМ УрО РАН. Оп. 4. Д.5.Л. 43. Подлинник.
- [44] Распоряжение УФАН АН СССР от 08 июля 1949 г. № 47/к. Научный архив ИФМ УрО РАН. Оп. 4. Д. 5. Л. 32. Подлинник.
- [45] Приказ и.о. директора ИФМ УФАН С.С. Носыревой от 02 сентября 1950 г. № 118. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 56. Л. 5. Подлинник.

- [46] Приказ и.о. директора ИФМ УФАН С.С. Носыревой от 10 февраля 1951 г. № 15. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф.2. Оп. 1. Д. 64. Л. 16. Подлинник.
- [47] Приказ директора ИФМ УФАН С.С. Носыревой от 31 декабря 1952 г. № 257. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 75. Л. 140. Подлинник.
- [48] Приказ вр.и.о. директора ИФМ УФАН М.Н. Михеева от 23 сентября 1953 г. № 235. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 83. Л. 80–81. Подлинник.
- [49] Приказ и.о. директора ИФМ УФАН М.Н. Михеева от 28 мая 1954 г. № 122. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2. Оп. 1. Д. 91. Л. 144 Подлинник.
- [50] Приказ и.о. директора ИФМ УФАН М.Н. Михеева от 21 июня 1956 г. № 40-к. Научный архив ИФМ УрО РАН. Оп. 4. Д. 12. Л. 39. Подлинник.
- [51] Приказ директора ИФМ УФАН М.Н. Михеева от 29 июня 1957 г. № 163. Депозитарий архивных фондов УрО РАН. Ф. 2 Оп. 1. Д. 120. Л. 53–54. Подлинник.
- [52] Постановление Президиума АН СССР от 15 мая 1959 г. № 315. Научный архив ИФМ УрО РАН. СИФ. 1959. Д. 3. Л. 279. Копия .
- [53] Постановление Президиума АН СССР от 11 января 1963 г. № 24. Архив РАН. Ф. 2. Оп. 6. Д. 31. Л. 8. Копия.
- [54] Приказ директора ИФМ АН СССР М.Н. Михеева от 28 декабря 1964 г. № 177-к. Научный архив ИФМ УрО РАН. Оп. 3. Д. 1022. Л. 15. Подлинник.
- [55] Приказ директора ИФМ АН СССР М.Н. Михеева от 15 марта 1968 г. № 36-к. Научный архив ИФМ УрО РАН. Оп. 39. Д. 29. Л. 64. Подлинник
- [56] Приказ директора ИФМ АН СССР М.Н. Михеева от 20 февраля 1969 г. № 51. Научный архив ИФМ УрО РАН. Оп. 35. Д. 7. Л. 78–79. Подлинник.
- [57] Приказ директора ИФМ АН СССР М.Н. Михеева от 28 июля 1969 г. № 239. Научный архив ИФМ УрО РАН. Оп. 35. Д. 8. Л. 261. Подлинник.
- [58] Приказ директора ИФМ АН СССР М.Н. Михеева от 19 ноября 1969 г. № 364-а. Научный архив ИФМ УрО РАН. Оп. 35. Д. 9. Л. 201. Подлинник.
- [59] Приказ директора ИФМ АН СССР М.Н. Михеева от 29 декабря 1969 г. № 419/203-к. Научный архив ИФМ УрО РАН. Оп. 35. Д. 9. Л. 291–293. Подлинник.
- [60] Приказ директора ИФМ АН СССР М.Н. Михеева от 30 марта 1970 г. № 35-к. Научный архив ИФМ УрО РАН. Оп. 39. Д. 38. Л. 138–139. Подлинник.
- [61] Приказ директора ИФМ АН СССР М.Н. Михеева от 26 февраля 1971 г. № 80. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1971. Д. 104. Л. 35. Подлинник.
- [62] Приказ директора ИФМ УНЦ АН СССР М.Н. Михеева от 15 июля 1971 г. № 277. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1971. Д. 104. Л. 115. Подлинник.
- [63] Приказ ИФМ УНЦ АН СССР М.Н. Михеева от 5 октября 1972 г. № 362. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1972. Д. 104. Т. 4. Л. 156–157. Подлинник.

- [64] Приказ директора ИФМ УНЦ АН СССР М.Н. Михеева от 12 февраля 1974 г. № 48. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1974. Д. 104. Л. 14–15. Подлинник.
- [65] Приказ директора ИФМ УНЦ АН СССР М.Н. Михеева от 13 декабря 1976 г. № 427. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1976. Д. 104. Л. 161–162. Подлинник.
- [66] Приказ директора ИФМ УНЦ АН СССР М.Н. Михеева от 19 апреля 1977 г. № 126. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1977. Д. 104. Л. 70–71. Подлинник.
- [67] Приказ директора ИФМ УНЦ АН СССР М.Н. Михеева от 3 мая 1977 г. № 148. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1977. Д. 104. Л. 85–86. Подлинник.
- [68] Приказ директора ИФМ УНЦ АН СССР М.Н. Михеева от 22 декабря 1977 г. № 426. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1977. Д. 104. Л. 232. Подлинник.
- [69] Приказ директора ИФМ УНЦ АН СССР М.Н. Михеева от 18 октября 1978 г. № 107. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1978. Д. 104. Т.2. Л. 117, 118. Подлинник.
- [70] Штатное расписание на 1979 г. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1979. Д.310. Л. 6–53. Подлинник .
- [71] Приказ директора ИФМ УНЦ АН СССР М.Н. Михеева от 15 июня 1979 г. № 66. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1979. Д. 104. Т.1. Л. 131–132 . Подлинник.
- [72] Приказ директора ИФМ УНЦ АН СССР М.Н. Михеева от 21 октября 1980 г. № 110. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1980. Д. 104. Т. 2. Л. 80–81. Подлинник.
- [73] Приказ директора ИФМ УНЦ АН СССР М.Н. Михеева от 29 января 1982 г. № 16. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1982. Д. 1252. Т. 1. Л. 36–39. Подлинник.
- [74] Приказ директора ИФМ УНЦ АН СССР М.Н. Михеева от 12 февраля 1982 г. № 28. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1982. Д. 1252. Т.1. Л. 63–64 . Подлинник.
- [75] Приказ директора ИФМ УНЦ АН СССР М.Н. Михеева от 6 апреля 1982 г. № 55. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1982. Д. 1252. Т.1. Л. 165. Подлинник.
- [76] Приказ директора ИФМ УНЦ АН СССР М.Н. Михеева от 22 марта 1983 г. № 53. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1983 г. Д. 1252. Т.1. Л. 121. Подлинник.
- [77] Приказ и.о. директора ИФМ УНЦ АН СССР Г.Г. Талуца от 13 августа 1986 г. № 130 . Научный архив ИФМ УрО РАН. 1986. Д. 1252. Т.2. Л. 15–17 . Подлинник.
- [78] Приказ директора ИФМ УНЦ АН СССР В.Е. Щербинина от 29 сентября 1986 г. № 150. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1986. Д. 1252. Т. 2. Л. 92–95. Подлинник.
- [79] Приказ директора ИФМ УНЦ АН СССР М.Н. Михеева от 14 марта 1986 г. № 43. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1986. Д. 1252. Т. 1. Л. 86. Подлинник.
- [80] Приказ директора ИФМ УНЦ АН СССР В.Е. Щербинина от 26 ноября 1986 г. № 186. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1986. Д. 1252. Т. 2. Л. 172. Подлинник.

- [81] Приказ директора ИФМ УрО АН СССР В.Е. Щербинина от 08 июня 1987 г. № 100. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1987 г. Д. 1252. Т.1. Л. 235–237 . Подлинник.
- [82] Приказ директора ИФМ УрО АН СССР В.Е. Щербинина от 7 мая 1988 г. № 73. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1988. Д. 1252 .Т. 1. Л. 219–220. Подлинник.
- [83] Приказ директора ИФМ УрО АН СССР В.Е. Щербинина от 29 июня 1988 г. № 107. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1988 г. Д. 1252. Т. 2. Л. 69–70. Подлинник.
- [84] Приказ директора ИФМ УрО АН СССР В.Е. Щербинина от 18 октября 1989 г. № 138. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1989 г. Д. 1252. Т. 2. Л. 199–200. Подлинник.
- [85] Приказ директора ИФМ УрО АН СССР В.Е. Щербинина от 10 января 1989 г. № 3. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1989. Д. 1252. Т.1. Л. 6–7. Подлинник.
- [86] Приказ директора ИФМ УрО АН СССР В.Е. Щербинина от 7 мая 1990 г. № 44-в. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1990 г. Д. 1252. Т. 1. Л. 125а. Подлинник.
- [87] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.Е. Щербинина от 25 января 1993 г. № 4. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1993 г. Д. 1252. Л. 67. Подлинник
- [88] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.Е. Щербинина от 18 июля 1995 г. № 40. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1995 г. Д. 1252. Л. 63. Подлинник.
- [89] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.Е. Щербинина от 29 февраля 1996 г. № 13. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1996 г. Д. 1252. Л. 55. Подлинник.
- [90] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.Е. Щербинина от 25 февраля 1997 г. № 13. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1997 г. Д. 1252. Л. 18. Подлинник.
- [91] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.Е. Щербинина от 14 октября 1997 г. № 84. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1997 г. Д. 1252. Л. 120. Подлинник.
- [92] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.Е. Щербинина от 30 октября 1997 г. № 96. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1997 г. Д. 1252. Л. 142. Подлинник
- [93] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.Е. Щербинина от 16 октября 1997 г. № 86. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1997 г. Д. 1252. Л. 124. Подлинник.
- [94] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.Е. Щербинина от 21 апреля 1998 г. № 30. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1998 г. Д. 1252. Л. 78. Подлинник .
- [95] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 27 ноября 1998 г. № 108. Научный архив ИФМ УрО РАН. 1998 г. Д. 1252. Л. 197–198. Подлинник.
- [96] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 12 мая 2000 г. № 26. Научный архив ИФМ УрО РАН. 2000 г. Д. 1252. Л. 80–81. Подлинник.
- [97] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 25 января 2001 г. № 4. Научный архив ИФМ УрО РАН. 2001 г. Д. 1252. Л. 8–9. Подлинник.

- [98] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 15 октября 2001 г. № 25. Научный архив ИФМ УрО РАН. 2001 г. Д. 1252. Л. 62–63. Подлинник.
- [99] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 10 октября 2003 г. № 20. Научный архив ИФМ УрО РАН. 2003 г. Д. 1252. Л. 66. Подлинник.
- [100] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 01 апреля 2005 г. № 7. Научный архив ИФМ УрО РАН. 2005 г. Д. 1252. Л. 10–11. Подлинник.
- [101] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 11 апреля 2007 г. № 15. Научный архив ИФМ УрО РАН. 2007 г. Д. 1252. Л. 75. Подлинник.
- [102] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 14 февраля 2007 г. № 5. Научный архив ИФМ УрО РАН. 2007 г. Д. 1252. Л. 18. Подлинник.
- [103] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 25 декабря 2008 г. № 38. Научный архив ИФМ УрО РАН. 2008 г. Д. 1252. Л. 64–66. Подлинник.
- [104] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 05 февраля 2009 г. № 2. Научный архив ИФМ УрО РАН. 2009 г. Д. 1252. Л. 4. Подлинник.
- [105] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 03 марта 2011 г. № 5. Научный архив ИФМ УрО РАН. 2011 г. Д. 1252. Л. 12. Подлинник.
- [106] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 15 марта 2012 г. № 16. Общий отдел ИФМ УрО РАН. 2012 г. Д. 1252. Подлинник.
- [107] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 03 октября 2013 г. № 55. Общий отдел ИФМ УрО РАН. 2013 г. Д. 1252. Подлинник.
- [108] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 03 февраля 2014 г. № 10. Общий отдел ИФМ УрО РАН. 2014 г. Д. 1252. Подлинник.
- [109] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 05 февраля 2014 г. № 12. Общий отдел ИФМ УрО РАН. 2014 г. Д. 1252. Подлинник.
- [110] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 05 февраля 2014 г. № 11. Общий отдел ИФМ УрО РАН. 2014 г. Д. 1252. Подлинник.
- [111] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 18 марта 2015 г. № 22. Общий отдел ИФМ УрО РАН. 2015 г. Д. 1252. Подлинник.
- [112] Приказ ректора УрФУ В.А. Кокшарова и директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 23 июня 2016 г. № 105. Общий отдел ИФМ УрО РАН. 2016 г. Д. 1252. Подлинник.
- [113] Приказ директора ИФМ УрО РАН В.В. Устинова от 18 мая 2017 г. № 57. Общий отдел ИФМ УрО РАН. 2017 г. Д. 1252. Подлинник.

ОТДЕЛ

МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ЛАБОРАТОРИЯ

микромагнетизма

Состав лаборатории

(по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Баранов Николай Викторович, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н., профессор
- Гервасьева Ирина Владимировна, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Губернаторов Владимир Васильевич, главный специалист-советник, д.т.н.
- Денисов Олег Федорович, ведущий технолог
- Дмитриева Наталья Васильевна, старший научный сотрудник
- Драгошанский Юрий Николаевич, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор
- Дубинина Лилия Степановна, инженер
- Дубовик Михаил Николаевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Ершов Николай Владимирович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Зарипова Рафида Бариковна, технолог
- Корзунин Леонид Геннадьевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Кочурин Валерий Анатольевич, ведущий инженер
- Лукшина Вера Анатольевна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Матвеева Валентина Степановна, технолог
- Милютин Василий Александрович, младший научный сотрудник
- Потапов Анатолий Павлович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Сычева Татьяна Сергеевна, научный сотрудник
- Тиунов Валерий Федорович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Филиппов Борис Николаевич, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор
- Чиркова Алиса Михайловна, младший научный сотрудник
- Шишкин Денис Александрович, научный сотрудник
- Якушева Марина Владимировна, ведущий документовед

ЛАБОРАТОРИЯ

прикладного магнетизма

Состав лаборатории

(по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Уймин Михаил Александрович, заведующий лабораторией, к.ф.-м.н.
- Андреева Ольга Борисовна, ведущий инженер
- Бызов Илья Владимирович, научный сотрудник
- Волегов Алексей Сергеевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Ермаков Анатолий Егорович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор
- Жаков Сергей Васильевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Захарова Галина Степановна, старший научный сотрудник, д.х.н.
- Конев Александр Сергеевич, ведущий инженер
- Курмачев Игорь Александрович, ведущий технолог
- Майков Владислав Владимирович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Меланин Кирилл Владимирович, лаборант
- Минин Артем Сергеевич, ведущий инженер
- Молев Михаил Германович, монтажник радиоэлектр. аппаратуры 6 разряд
- Мысик Алексей Александрович, научный сотрудник
- Новиков Сергей Иванович, ведущий технолог
- Огурцов Николай Михайлович, ведущий технолог
- Потапова Лариса Демьяновна, ведущий технолог
- Разумов Илья Кимович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Страхов Сергей Леонидович, ведущий технолог
- Страхова Татьяна Васильевна, ведущий документовед
- Фаттахова Зилара Амирахматовна, лаборант

ЛАБОРАТОРИЯ

ферромагнитных сплавов

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Мушников Николай Варфоломеевич, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н., академик РАН, профессор
- Вершинин Константин Владимирович, термист 6 разряд
- Власова Нина Ивановна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Гавико Василий Семенович, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Герасимов Евгений Германович, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Головня Оксана Александровна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Ермоленко Александр Семенович, главный специалист-советник, д.ф.-м.н., профессор
- Инишев Александр Александрович, инженер-исследователь
- Клейнерман Надежда Михайловна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Колодкин Денис Александрович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Королев Александр Васильевич, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Кучин Анатолий Георгиевич, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Лагунова Вера Ивановна, ведущий инженер
- Лапина Татьяна Павловна, ведущий технолог
- Лисицина Галина Семеновна, ведущий документовед
- Маркин Павел Елизарович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Наумов Сергей Павлович, младший научный сотрудник
- Платонов Сергей Павлович, младший научный сотрудник
- Попов Александр Гервасиевич, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Протасов Андрей Владимирович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Прошкин Алексей Владимирович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Сериков Вадим Вячеславович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Сташкова Людмила Алексеевна, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Терентьев Павел Борисович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Щеголева Нина Никифоровна, научный сотрудник
- Язовских Ксения Александровна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

ИСТОРИЯ физики магнитных явлений на Урале

История физики магнитных явлений и исследований магнитных материалов на Урале берёт своё начало, как и история всей академической науки Урала, с 1932 г. В составе группы сотрудников Ленинградского физтеха, направленных Абрамом Фёдоровичем Иоффе в Свердловск, были командированы специалисты, которые с самого начала задали очень высокую планку исследований. Это, прежде всего, Яков Григорьевич Дорфман, руководитель магнитной лаборатории ЛФТИ. Несмотря на молодость, (в 1932 г. ему было 34 года, по современным меркам – молодой учёный), он был автором ряда выдающихся работ в области магнетизма. В 1925 г. он теоретически предсказал явление электронного парамагнитного резонанса (открытое Е.К. Завойским в 1942 г.). В 1927 г. в экспериментах по отклонению бета-лучей в никелевой фольге он доказал, что молекулярное поле Вейсса имеет не магнитную природу, как тогда считалось, а электрическую. Совместно с Я.И. Френкелем в 1930 г. он создал первую теорию доменной структуры ферромагнетиков, показав, что возникновение доменной структуры и её размер связаны с конкуренцией обменных сил и размагничивающих полей. Уже в период его работы в Свердловске, в 1933 г. была опубликована книга «Физика металлов. Электрические, оптические и магнитные свойства» [1], написанная им совместно с И.К. Кикоиным. Книга была первой монографией на русском языке, в которой излагалось электронное строение ферромагнитных сплавов на основе данных об атомных магнитных моментах, и одной из первых в мировой литературе по этим вопросам. Я.Г. Дорфман принимал активное участие в организации и становлении Уральского физико-технического института. Он был первым заместителем директора по научной части УралФТИ с 1932 по 1938 гг. до своего переезда в Баку.

Другой выдающийся учёный первого призыва – Рудольф Иванович Янус. И хотя его заслуженно считают отцом научного направления дефектоскопии на Урале, он внёс очень большой вклад в развитие магнитного материаловедения. Крупный учёный, признанный специалист в области теоретического, экспериментального и прикладного магнетизма, он является родоначальником уральской школы магнитологов. Р.И. Янус был специалистом высокого класса по проведению самых тончайших магнитных измерений. Разнообразие схем и методов магнитных измерений (баллистический метод, феррозонды, весы Фарадея и т.д.), которые были развиты Р.И. Янусом с учениками, позволило решать любые задачи, которые возникали при разработке магнитных материалов.

Активная научно-исследовательская деятельность в области физики магнитных явлений на Урале неразрывно связана с именем Якова Савельевича Шура (1908–1986 гг.). В 1932 г. он окончил Ленинградский госуниверситет. Только что назначенный директором создаваемого УралФТИ аспирант М.Н. Михеев уговорил его ехать в Свердловск. С 1932 г. вместе с Р.И. Янусом он занимается исследованием парамагнетизма газов. Впервые была установлена неизменность магнитной восприимчивости органических соединений при переходе из жидкого состояния в газообразное. Затем объектами научного интереса молодого коллектива становятся металлы и сплавы, изготавливаемые на уральских заводах.

Одним из актуальных вопросов физики магнитных явлений в 30-х годах XX века был вопрос о природе магнитного гистерезиса в ферромагнетиках. Разрабатывались основные механизмы перемагничивания – механизм смещения доменных границ и вращения векторов намагниченности. Если доменная стенка смещается под действием приложенного поля, то коэрцитивная сила должна зависеть от ориентации поля относительно доменной стенки. В 1938 г. Я.С. Шуру на монокристаллах кремнистого железа удалось экспериментально показать существование анизотропии коэрцитивной силы и связи этой анизотропии с кристаллографической ориентацией образца [2]. С.В. Вонсовский создал теорию, которая хорошо соответствовала эксперименту. Эти пионерские работы послужили основой для достижения высоких магнитных характеристик электротехнических сталей за счёт создания кристаллической и магнитной текстуры. Открытые в те годы способы термомагнитной и термомеханической обработки до сих пор служат для улучшения технических характеристик магнитомягких материалов.

В годы Великой Отечественной войны 1941–1945 гг. ведущие учёные-магнитологи института (в то время – Института металлфизики и металлургии) были заняты разработкой магнитных методов контроля выпускаемой военной продукции. Глубокое знание теоретических основ магнетизма позволило Я.С. Шуру и С.В. Вонсовскому создать магнитные дефектоскопы и внедрить их на уральских заводах [3]. Применение этих приборов обеспе-

чило значительное увеличение выпуска заготовок артиллерийских снарядов, а сами авторы разработок постоянно присутствовали на полигонных испытаниях, демонстрируя надёжность магнитных методов контроля структуры изделий. За этот вклад в Победу Я.С. Шур и С.В. Вонсовский были награждены боевыми орденами Красной Звезды.

Но даже в военное время основное внимание уделялось фундаментальным исследованиям. Лаборатория магнитных явлений быстрыми темпами наращивала свой научный потенциал. Распоряжением первого директора ИФМ М.Н. Михеева за № 2 от 14.01.1944 г. из группы сотрудников лаборатории магнитных явлений – Я.С. Шура, С.В. Вонсовского, В.И. Дрожжиной, Л.А. Шубиной была образована лаборатория ферромагнетизма и магнитных материалов. Направления фундаментальных исследований в области магнетизма были тесно связаны с нуждами уральских металлургических и электротехнических предприятий. Они включали выяснение природы ферромагнетизма металлов переходных групп, магнитного гистерезиса, магнитной анизотропии и магнитной текстуры ферромагнетиков, а также улучшение свойств магнитомягких и магнитотвёрдых сплавов. Результат работы коллектива был обобщён в монографии «Ферромагнетизм» [5], опубликованной в 1948 г. и не потерявшей актуальность до настоящего времени.

Я.С. Шур, назначенный заведующим лабораторией, определил её чёткую структуру, состоящую из тесно взаимодействующих групп. Они были созданы на основе сложившихся направлений исследований, которые продолжают оставаться и в настоящее время основными в трёх магнитных лабораториях теперь уже отдела магнитных материалов ИФМ УрО РАН. Перечисление этих групп, руководимых ведущими научными сотрудниками, показывает широту тематики исследований. В 1973 г. это были группы – теоретических исследований (Б.Н. Филиппов), тонких магнитных плёнок (А.А. Глазер), сплавов на основе редкоземельных элементов (А.С. Ермоленко), исследований кристаллоструктуры (Л.М. Магат), процессов технического намагничивания (В.А. Зайкова), механизма наведённой магнитной анизотропии (И.Е. Старцева), доменной структуры и электромагнитных потерь в магнитомягких ферромагнетиках (Ю.Н. Драгошанский), доменов взаимодействия в высококоэрцитивных сплавах (М.Г. Лужинская), магнитоstrictionных материалов (Н.А. Баранова), порошковых магнитных материалов (А.Е. Ермаков), резонансных методов (В.В. Сериков), а также технологическая группа (В.Г. Майков), экспериментальная мастерская (Н.А. Компанейцев), конструкторская группа (В.С. Аверкиев) и Таватуйская физико-гидрологическая станция (А.И. Меркурьев)

С расширением научной тематики рос и коллектив лаборатории. В начале 80-х гг. он составлял 122 сотрудника, вклю-



Руководители исследовательских групп лаборатории ферромагнетизма. 1984 г.
Слева: А.Е. Ермаков, В.В. Останин, А.А. Глазер, В.Г. Майков, Г.В. Иванова, Я.С. Шур,
мастера А.П. Ферефёров и Н.И. Шелков, Ю.Н. Драгошанский, Л.М. Магат –
победители соц. соревнования научных подразделений ИФМ УНЦ АН СССР.

чая научных сотрудников, инженерно-технических работников и лаборантов. Коллектив успешно работал по трём основным направлениям исследований – магнитомягкие материалы, редкоземельные интерметаллиды, проблемы прикладного магнетизма. Согласно этим трём направлениям, исследований после ухода из жизни Я.С. Шура по приказу директора института № 150 от 29.09.1986 г. лаборатория ферромагнетизма была преобразована в отдел ферромагнетизма в составе трёх лабораторий: магнитомягких материалов (заведующий – Борис Константинович Соколов), ферромагнитных сплавов (заведующий – Александр Семенович Ермоленко) и прикладного магнетизма (заведующий – Анатолий Егорович Ермаков). Руководителем отдела ферромагнетизма был назначен академик С.В. Вонсовский, его заместителем – к.ф.-м.н. Ю.Н. Драгошанский. Сегодня три лаборатории, входящие в состав отдела магнитных материалов, возглавляемые Н.В. Барановым, Н.В. Мушниковым и М.А. Уйминым, в основном сохраняют научные направления, сформированные под руководством Я.С. Шура. Рассмотрим эти направления более подробно.

Магнитомягкие материалы

Среди всех магнитных материалов, производимых в мире, наибольший объём занимают магнитомягкие материалы и в первую очередь, электротехнические стали. Потери энергии при перемагничивании магнитопроводов в трансформаторах и электро-

генераторах составляют не менее 6% от всей вырабатываемой электроэнергии. Поэтому снижение магнитных потерь в электротехнических сталях представляет собой важнейшую задачу.

Изучение природы магнитного гистерезиса и механизма формирования доменной структуры было чрезвычайно важно для совершенствования свойств трансформаторных сталей. Для повышения магнитных характеристик огромной массы этих технически важных ферромагнетиков необходимо было знать вид и динамическое поведение их магнитных доменов, в значительной мере ответственных за уровень магнитных свойств. Прежде всего, нужно было разработать сравнительно простые, надёжные и информативные методы наблюдений. В ИФМ под руководством Я.С. Шура был разработан метод порошковых фигур, включающий приготовление стабильных суспензий из частиц магнетита микронных размеров и получение полированной не напряжённой поверхности образца [4]. Магнитооптические методы, основанные на повороте плоскости поляризации света при прохождении или отражении от намагниченной среды (эффект Керра), метод сканирования быстротекущих процессов, метод рентгеновской дифракционной топографии позволяли исследовать сложные изменения доменной структуры сплавов в постоянных, переменных и вращающихся магнитных полях, а также при изменении температуры и напряжённого состояния исследуемых материалов. Ю.Н. Драгошанский создал методику наблюдения магнитных доменов в листах стали одновременно на двух противоположных её поверхностях. Это позволило ему впервые в мире построить объёмную многофазную модель доменов, замыкающих магнитный поток внутри образца. Эта многофазная модель замыкающих доменов позволила впоследствии объяснить физический механизм положительного влияния локальной лазерной обработки на магнитные свойства многоосных материалов. В.А. Зайкова выполнила пионерские исследования влияния термоманитной обработки на доменную структуру кремнистого железа. Работы по влиянию кристаллографической текстуры на магнитные свойства электротехнических сталей проводились в ИФМ под руководством Б.К. Соколова и в УрГУ Ф.Н. Дунаевым.

Впервые в мировой практике в ИФМ была установлена оптимальная кристаллографическая ориентация зёрен трансформаторных сталей, соответствующая минимуму магнитных потерь. Как было показано экспериментально, минимальным электромагнитным потерям соответствует не идеальная ребровая ориентация кристалла, а наклонное относительно поверхности положение намагниченности в нём. В дальнейшем в лабораторных исследованиях было определено поведение магнитных доменов в монокристаллических и поликристаллических магнитомягких ферромагнетиках под действием упругих напряжений, изменения температуры в постоянных, знакопеременных и вращающихся магнитных полях.

Эти детальные знания о доменной структуре позволили предложить эффективные пути совершенствования магнитных свойств многих ферромагнитных сплавов и прежде всего трансформаторных сталей. В этих целях на научно-техническом совещании, организованном Я.С. Шуром на базе Верх-Исетского металлургического завода в апреле 1977 г., по его предложению и под его председательством была организована секция «Электротехнические стали» при научном совете АН СССР по проблеме «Физика магнитных явлений». Эта межведомственная секция, состоящая из специалистов исследовательских институтов, университетов и заводских лабораторий, стала координатором деятельности исследовательских учреждений страны, работающих над повышением качества электротехнических сталей. Ежегодно при Свердловском доме науки и техники проводились научно-технические конференции по физике магнитомягких материалов и повышению качества электротехнических сталей.

Фундаментальные исследования проводились в тесной кооперации с заводскими лабораториями металлургических заводов (Челябинский, Липецкий, Череповецкий, Ашинский, Верх-Исетский) и с отраслевыми институтами (Всесоюзный институт трансформаторостроения, г. Запорожье, Институт прецизионных сплавов ЦНИИЧермет, г. Москва, УЗПС, г. Берёзовский, Ленинградский НИИ электрофизической аппаратуры). В 1970-х гг. группа сотрудников (В.В. Губернаторов, Ю.Н. Драгошанский, Б.К. Соколов) разработала элементы технологии для Ашинского металлургического завода по производству тонкой (менее 80 мкм) ленты трансформаторной стали для высокочастотных применений. Совместно с сотрудниками Института химии УНЦ на основе изучения влияния плоскостных напряжений разработаны и внедрены магнитоактивные электроизоляционные покрытия на сталь и аморфную магнитную ленту.

В дальнейшем на основе изучения индуцированной магнитной анизотропии и зависимости магнитных потерь от размеров доменов был разработан ряд эффективных технологических способов управления величиной зерна в стали, типом и размерами магнитных доменов, подвижностью доменных границ. Это обеспечивалось за счёт термомеханических обработок и введения в материал упорядоченных магнитных неоднородностей. Результаты работ не только дали новые знания о процессах перемагничивания и природе свойств магнитных материалов, но и способствовали решению важной производственной задачи – организации производства электротехнической стали с магнитными потерями менее 0,95 Вт/кг на базе нового цеха холодной прокатки Верх-Исетского металлургического завода. При этом новые способы управления динамикой магнитных доменов, позволяющие в лабораторных условиях снижать магнитные потери в сталях на 25–27% [6], раскрывают производственникам боль-



Участники Всесоюзного совещания «Повышение качества электротехнических сталей». 1977 г.
 Слева: Л.Б. Казаджан (НЛМК, Липецк), Е.Л. Лыков (ВИЗ), Б.В. Молотиллов (ЦНИИЧермет, Москва), М.А. Горланова, В.Я. Шур (УрГУ), Ф.А. Радин (ВИЗ), В.М. Иньков (ИФМ), В.В. Дружинин (ВИЗ), И.Е. Старцева, Б.К. Соколов, В.А. Зайкова, В.Д. Садовский (ИФМ), А.З. Векслер (ВНИИМ), С.В. Вонсовский (ИФМ), Ю.Л. Бормотов, Р.Д. Нуралиева (НИИРК, Москва), М.Н. Михеев (ИФМ), И.Я. Эйнгорн (ВИТ, Запорожье), Я.С. Шур (ИФМ), З.Н. Бульчева (ИПС ЦНИИЧермет, Москва), М.Я. Шулькин (ЧМЗ, Челябинск), Н.В. Кондратьев (ВНИИЭлектромаш, Москва), В.С. Славкин (МинЧермет, Москва), М.Б. Цырлин, Ю.Н. Стародубцев (ВИЗ), Ю.Н. Драгошанский (ИФМ), Р.Б. Пужевич (ВИЗ), Ю.А. Вдовин (ВНИИМ), Б.Н. Баландин (ИФМ), Л.И. Малкина (УЗПС, Берёзовский), Г.А. Первухина, В.М. Кавтрев (ВИЗ).

шие перспективы дальнейшего совершенствования магнитных свойств электротехнических материалов.

Сегодня отдельные проблемы, связанные с физикой магнитомягких электротехнических сталей, продолжают решать сотрудники лаборатории микромагнетизма Ю.Н. Драгошанский, В.В. Губернаторов, В.Ф. Тиунов. Одно из новых направлений – термообработка лент из ферромагнитных сплавов в сильном постоянном магнитном поле до 30 Тл (И.В. Гервасьева). Обнаружено, что приложение внешнего магнитного поля задерживает процессы возврата и ранних стадий рекристаллизации, а также способствует ускоренному росту зёрен, ось лёгкого намагничивания которых совпадает с направлением поля.

В 60-х годах в мире возникает новое направление – аморфные магнитомягкие материалы. В лаборатории была создана экспериментальная установка для получения лент аморфных ферромагнетиков методом быстрой закалки расплава на поверхности вращающегося медного диска (А.П. Потапов). Исследования структуры и свойств этих магнитомягких материалов показали перспективность их для использования в малогабаритных устройствах в области повышенных частот перемагничивания. Этот новый класс магнитомягких материалов имеет высокое электросопротивление и при малой толщине ленты обладает низким уровнем

магнитных потерь и высокой магнитной проницаемостью. Магнитные свойства материала существенно улучшаются в результате применения локально деформирующих и текстурирующих воздействий [7]. Работа признана одним из лучших изобретений в России за 2011 г. (Приказ Роспатента № 80 от 22.06.2012, Москва), а авторы были награждены серебряной медалью и дипломом международной выставки «Современные материалы для инновационных применений в электротехнике и электронике» (Швейцария, Женева, 2013 г.). Созданные в лаборатории аморфные материалы были переданы для использования на предприятиях электронной промышленности и в геологоразведке.

Следующим шагом в развитии магнитомягких материалов явилось открытие нанокристаллических многокомпонентных сплавов, которые обладают более высокой намагниченностью по сравнению с аморфными сплавами. В отделе проводились комплексные исследования структуры и магнитных свойств нанокристаллических сплавов. Особенно полезным для понимания механизмов формирования магнитных свойств оказалось проведение мессбауэровских исследований (В.В. Сериков, Н.М. Клейнерман). Сегодня нанокристаллические магнитомягкие материалы выпускаются в нашей стране в промышленных масштабах, в том числе, в ООО «Гаммамет», с использованием наработок учёных ИФМ.

Задачи настоящего периода исследования нанокристаллических сплавов включают разработку составов, обладающих повышенной температурной стабильностью (Б.Н. Филиппов, В.А. Лукшина). На основе нанокристаллического магнитомягкого материала, содержащего железо и кобальт, путём введения в него тугоплавких элементов разработан состав $(\text{Fe}_{0,7}\text{Co}_{0,3/88}\text{Hf}_2\text{W}_2\text{Mo}_2\text{Zr}_1\text{V}_4\text{Cu}_1$ и подобраны условия нанокристаллизующего отжига, обеспечивающие стабильность структуры и магнитных свойств при нагреве до 570 °С.

Постоянные магниты

Одним из важных направлений деятельности лаборатории было и остаётся направление, связанное с разработкой магнитотвёрдых материалов. В середине прошлого века постоянные магниты изготавливались из сплавов на основе переходных 3d-элементов. В лаборатории под руководством Я.С. Шура при участии В.Г. Майкова, Н.А. Барановой, М.Г. Лужинской был разработан пластически деформируемый сплав термехвако на основе известного к тому времени сплава викаллой. Обладая повышенной намагниченностью и высокой температурной и временной стабильностью магнитных характеристик, этот новый материал заменил шведскую сталь в качестве магниточувствительных элементов в морских магнитных компасах, которыми были оборудованы 45 тысяч судов флота Советского Союза.

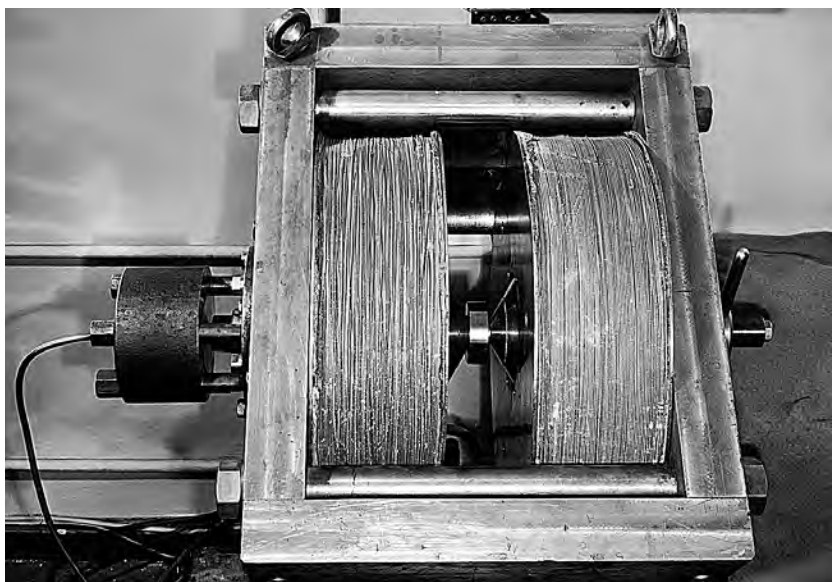
В 1966 г. Хоффер и Стрнэт сообщили о необычно высокой энергии одноосной магнитокристаллической анизотропии соеди-

нения YCo_5 , что послужило толчком к началу интенсивных исследований интерметаллидов редкоземельных металлов с 3d-металлами как перспективных материалов для постоянных магнитов. Вскоре были реализованы первые постоянные магниты из порошков соединения SmCo_5 с максимальным энергетическим произведением $(\text{BH})_{\text{max}} = 20 \text{ МГсЭ}$, что вдвое превышало предельно достигаемое значение этой характеристики в известных к тому времени магнитах из сплавов типа тиконал. Обладая к тому же очень высокой (порядка 20 кЭ) коэрцитивной силой, эти магниты позволяли резко улучшить эксплуатационные характеристики устройств, используемых, в частности, в космической и оборонной технике.

Учитывая перспективность новой тематики, Я.С. Шур принял решение об освоении технологии получения редкоземельных постоянных магнитов. Для этой цели была создана группа с участием специалистов-физиков А.В. Дерягина, А.С. Ермоленко и технологов В.С. Аверкиева, Л.М. Магата, Н.А. Решетникова. Дирекция института выделила помещение для организации технологического цикла, который включал синтез исходных сплавов, дробление слитков и их помол в шаровых мельницах, ориентирование порошков в магнитном поле с последующим их прессованием, спекание,



Н.А. Баранова, В.С. Аверкиев и Я.С. Шур около магнитного морского компаса, подаренного благодарными моряками.



Совмещённый с прессом электромагнит (конструкции В.С. Аверкиева), между полюсами которого впервые получен в ноябре 1969 г. в лаборатории постоянный магнит из сплава SmCo_5 с максимальной магнитной энергией в 20 МГсЭ.

шлифовку и измерение магнитных свойств полученного магнита. Основные трудности возникли с прессованием сплавов. Создаваемая магнитным полем текстура порошков в значительной степени нарушалась в процессе прямого прессования. Н.А. Решетников предложил изостатическое прессование в резиновой втулке, закрытой с торцов резиновыми пластинами. Эффект оказался разительным: удавалось получать текстуру до 98 % при достигаемой плотности порошка 70–85 %. Технология прессования в резиновой втулке и сегодня является одной из основных при производстве постоянных магнитов методом порошковой металлургии.

Уже в 1970 г. в лабораторных условиях получены постоянные магниты на основе сплава SmCo_5 с магнитными характеристиками на уровне сообщаемых в зарубежной печати [8]. Эта работа была продолжена на созданном в лаборатории участке по производству опытных партий магнитов под руководством В.Г. Майкова. Здесь отработывались оптимальные составы сплавов, технологические параметры изготовления магнитов. Работы выполнялись по хозяйственным договорам с промышленными предприятиями, которым передавались опытные образцы вместе с технологией их производства. Так, на Пышминском опытном заводе Гиредмет было организовано крупное производство редкоземельных постоянных магнитов, в первую очередь, для высокотехнологичной оборонной промышленности.

Сотрудники лаборатории выполнили и ряд важных разработок для отечественной техники и медицины, показавшие на практике

большие возможности новых высокоэнергетических редкоземельных магнитов. Это были «защёлки» на льнопрядильных станках Яковлевского льнокомбината (Ивановская обл.), магнитные «захваты» на производственных участках автопрома (филиал «ЗИЛ», г. Миасс), бесконтактные магнитные муфты для подвижных систем машиностроения, приборы для медицины (в частности, эффективные «глазные» и «челюстные» магниты и устройства для лечения костных тканей по методу проф. Г.А. Елизарова). Все они поднимали производительность труда, облегчая труд и укрепляя здоровье граждан. Эти разработки затем были переданы в КБ соответствующих ведомств для тиражирования, и депутат Верховного совета РСФСР акад. С.В. Вонсовский держал на контроле их продвижение.

Следующее поколение магнитотвёрдых материалов связано с разработкой спеченных магнитов из сплавов Sm-Co-Fe-Cu-Zr [5], обладающих наилучшим сочетанием высоких значений $(BH)_{\text{max}}$ и температурной стабильности магнитных гистерезисных свойств. Начиная с 1977 г. в лаборатории ферромагнетизма проводились систематические исследования по установлению связи между магнитными свойствами и структурой этих сплавов. Было обнаружено явление аномальной температурной зависимости коэрцитивной силы [9], которое позволяет значительно расширить температурный интервал работы постоянного магнита. Задел, полученный в 90-х годах прошлого века, не потерял свою актуальность. Сегодня в России востребованы высокоэнергетические постоянные магниты Sm-Co-Fe-Cu-Zr с температурой эксплуатации до 550 °С. Работы в этом направлении выполняет группа А.Г. Попова.

В 1983 г. на фирме Sumitomo Special Metals (Япония) была разработана и внедрена технология массового производства третьего поколения редкоземельных магнитов на основе интерметаллического соединения $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Производство спеченных магнитов Nd-Fe-B началось со следующего года после их технической презентации и затем удваивалось ежегодно. Расширение спроса на магниты Nd-Fe-B вызвано их относительно низкой стоимостью и высокими эксплуатационными характеристиками, что позволило активно применять их в электронной продукции, и, прежде всего, в приводах жёстких дисков компьютеров. В настоящее время достигнутое в лаборатории Hitachi Metals рекордное значение $(BH)_{\text{max}} = 59,5$ МГсЭ составляет 92 % от теоретического предела для соединения $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$.

Россия, вследствие затянувшегося процесса смены экономического уклада, существенно отстала в освоении наукоёмкой технологии производства магнитов Nd-Fe-B . Более двух десятков лет уровень максимального энергетического произведения магнитов, полу-



«Таблетка» магнита из сплава SmCo_5 в 1,5 г удерживает гиру весом 1 кг.

чаемых в отечественных лабораториях и на производственных предприятиях, не превышал 35–40 МГцЭ. Существенный скачок был достигнут в 2009 г., когда совместными усилиями сотрудников лаборатории ферромагнитных сплавов ИФМ, УрГУ и НПП «Нео-Маг» был разработан и внедрён на ФГУП «Уральский электромеханический завод» низкокислородный процесс получения магнитов на основе Nd–Fe–B [10]. В последние годы впервые в России на ФГУП «Уральский электромеханический завод» совместно с ИФМ УрО РАН реализован уникальный высокотехнологичный проект по производству редкоземельных постоянных магнитов с использованием специализированного оборудования японских фирм. При этом впервые освоен полный опытно-промышленный цикл изготовления высокоэнергетических магнитов Nd–Fe–B, от плавки исходных редкоземельных сплавов до изготовления сложных по форме и прецизионных спецмагнитов, параметры которых соответствуют уровню ведущих компаний, производящих магниты в Японии и Китае.

Работы последних лет, выполняемые в лаборатории под руководством А.Г. Попова, находятся на передовых позициях в России и востребованы промышленностью. Предложены способы повышения остаточной индукции и коэрцитивной силы спечённых магнитов Nd–Fe–B на основе ресурсосберегающего метода порошковой металлургии, исключая процесс прессования порошков. Применение при измельчении порошков поверхностно-активных внутренних смазок на основе эфиров жирных кислот позволило повысить остаточную индукцию магнитов на 7%. Путём осуществления диффузии атомов диспрозия и тербия по границам зёрен коэрцитивная сила увеличена на 60%. Внедрение этих способов в технологию создаёт возможность получения более дешёвых высококачественных магнитов Nd–Fe–B.

Магнитострикционные материалы

Явление изменения размеров и формы магнитных материалов при изменении их магнитного состояния находит практическое применение в генераторах ультразвука и двигателях микроперемещений. Такие устройства имеют важное значение для подводной акустики, адаптивной оптики, добычи полезных ископаемых. Работы по созданию магнитострикционных материалов и устройств в лаборатории ферромагнетизма в середине прошлого века возглавляла Н.А. Баранова. Наличие высококвалифицированных специалистов, современного оборудования и развитой инфраструктуры (испытательный бассейн в ИФМ, Таватуйская физико-гидрологическая станция, испытательный комплекс в Крыму) позволили быстро достичь выдающихся результатов. За разработку высокоэффективных изделий из магнитных материалов с уникальным сочетанием магнитомягких, магнитострикционных, антикоррозионных и тепловых свойств сотрудникам лаборатории

В.С. Аверкиеву, Н.А. Барановой, Н.А. Решетникову и Я.С. Шуру в 1967 г. была присуждена Государственная премия СССР.

Не менее важные работы велись для нефтегазовой промышленности. К 1980 г. совместно с ВНИИЯГНПО «Нефтегеофизика» и УПИ (ныне УрФУ) сотрудниками лаборатории В.И. Бородиным, В.В. Таракановым, В.В. Останиным разработан метод и создана аппаратура акустического воздействия на прискважинные зоны нефтяных и водонасыщенных пластов, усиливающие приток жидкости. Аппаратура с большим экономическим эффектом успешно работала на месторождениях Западной Сибири и Урала. Важные исследования и разработки новых материалов и изделий отмечены в 1986 г. Премией Совета Министров СССР. Лауреатами премии стали В.И. Бородин, В.В. Останин, Я.С. Шур.

В начале 70-х гг. прошлого века группа исследователей из Naval Surface Weapons Center, США, сообщила об открытии гигантской магнитострикции в редкоземельных фазах Лавеса TbFe₂ и (Tb,Dy)Fe₂, превышающей более чем на порядок значения линейной магнитострикции традиционных материалов на основе Fe, Co и Ni. В лаборатории ферромагнитных сплавов А.В. Королевым была разработана технология производства литых и металлокерамических стержней на основе фаз Лавеса с положительной и отрицательной магнитострикцией. Опытные образцы в рамках хозяйственных работ были переданы специалистам Ленинградского оптико-механического объединения для создания устройств адаптивной оптики.

В 80-е годы было обнаружено, что деформации в несколько процентов могут быть получены при реализации управляемого магнитным полем мартенситного превращения, в частности, в сплавах Гейслера на основе Ni₂MnGa. А.Г. Попов и Е.В. Белозеров смогли получить единственный в России монокристалл Ni₂MnGa, в котором линейная деформация, связанная с перестройкой мартенситных доменов в магнитном поле, составила 6% [11]. Сильные магнитострикционные эффекты могут быть получены при индуцированном магнитным полем переходе из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние. Недавно было показано, что объёмная магнитострикция при таких переходах в (La,Sm)Mn₂Si₂ достигает 2,8×10⁻³ [12]. К сожалению, магнитострикционные материалы сегодня слабо востребованы промышленностью, в частности, из-за того, что они проигрывают по ряду эксплуатационных параметров относительно дешёвым пьезокерамикам.

Наноматериалы

Металлокерамическая технология изготовления постоянных магнитов включает, как этап, механическое измельчение материала. При оптимизации условий обработки редкоземельных интерметаллидов в 70-х гг. прошлого века было обнаружено, что начиная с некоторого времени измельчения коэрцитивная сила

и намагниченность резко снижались. Природа этого явления была неизвестна. С помощью методов рентгеновской дифракции, электронной микроскопии и эффекта Мессбауэра группе под руководством А.Е. Ермакова удалось доказать, что эти явления связаны с переходом материала в нанокристаллическое и далее в аморфное состояние, для которых характерно снижение магнитных свойств [13]. Эти исследования дали начало новому направлению – физикохимии твердотельных реакций. На Международном симпозиуме по метастабильным, аморфным и наноструктурированным материалам (Германия, Дрезден, 1999 г.) А.Е. Ермакову была присуждена золотая медаль за пионерские работы по аморфизации интерметаллидов.

Метод механоактивации в энергонасыщенных мельницах позволяет получать новые метастабильные фазы, не существующие на равновесной фазовой диаграмме. В процессе воздействия в сплавах могут реализоваться различные превращения: аморфизация и разупорядочение, образование пересыщенных твердых растворов, расслоение сплавов с неограниченной растворимостью, распад равновесных фаз, циклические реакции. За цикл работ по механической активации оксидных и металлических систем А.Е. Ермакову и В.А. Баринову в 1993 г. была присуждена Государственная премия РФ в области науки и техники.

Задачи по изучению зависимости магнитных свойств материалов от размера частиц были инициированы Я.С. Шуром, О.А. Ивановым и С.В. Вонсовским. Уже в конце 1968 г. в ИФМ А.Е. Ермаковым создана установка газофазного синтеза наноматериалов. Первая научная работа была посвящена изучению магнитных свойств частиц никеля разных размеров в диапазоне состояний от многодоменного до суперпарамагнитного. Современные установки газофазного синтеза лаборатории прикладного магнетизма позволяют получать металлические или оксидные наночастицы в диапазоне размеров от 2 до 100 нм, а также нанокompозиты – металлические частицы, капсулированные в углерод или оксид кремния.

Наноразмерные порошки рассматриваются как перспективные материалы для целого ряда приложений. В поисках возможностей их практического использования сотрудники лаборатории прикладного магнетизма под руководством М.А. Уймина и А.Е. Ермакова проводят совместные междисциплинарные исследования. Совместно со специалистами Института иммунологии и физиологии УрО РАН и Института экологии и генетики микроорганизмов исследуются возможности адресной доставки лекарственных средств в организме, использования наноматериалов как усилителей контраста при визуализации изображений методами магнитной томографии, в качестве магнитных меток при разработке биосенсоров. Работы в области лазерной деструкции опухолей и магнитной гипертермии проводятся совместно с Институтом

общей физики РАН. Каталитическая активность наноматериалов исследуется совместно с РФЯЦ ВНИИ технической физики им. ак. Е.И. Забабахина.

Большой потенциал использования наноматериалов обеспечивает постоянно растущий интерес исследователей. Вместе с тем, многие фундаментальные вопросы, касающиеся понимания природы особых магнитных свойств наноматериалов и механизмов их взаимодействия с живыми организмами, пока далеки от своего решения. Предстоит ещё очень много сделать для того, чтобы обеспечить широкое и безопасное применение наноматериалов в различных областях техники, химической промышленности и медицины.

Фундаментальные исследования магнитных свойств материалов

На протяжении всей деятельности лаборатории ферромагнетизма, а затем отдела магнитных материалов, фундаментальным научным исследованиям уделялось особое внимание. Создавались вновь и постоянно совершенствовались методы получения сплавов и выращивания монокристаллов, экспериментальные установки для исследования магнитных свойств и структуры. Важным моментом, определяющим уровень исследований, стало создание измерительной техники, работающей при низких температурах и в сильных магнитных полях. При активной помощи В.С. Аверкиева и Н.А. Решетникова были созданы магнитометры, позволявшие проводить измерения в диапазоне температур от 4,2 до 400 К в сверхпроводящем солениоде с предельным магнитным полем до 100 кЭ и высокотемпературные измерения до 900 К в электромагните.

Сегодня наиболее ценное оборудование, используемое сотрудниками отдела, сосредоточено в центре коллективного пользования, а сотрудники лаборатории А.В. Королев, В.С. Гавико и Е.Г. Герасимов руководят его подразделениями, выполняя также работы в интересах других лабораторий.

Направления научных исследований отдела очень разнообразны. Развитие вычислительной техники в 70–80 гг. прошлого века потребовало новых форм записи и считывания информации. Одним из наиболее перспективных направлений в то время считалась запись на цилиндрических магнитных доменах в тонких магнитных плёнках.

Исследования структуры и свойств магнитных плёнок в отделе были начаты А.А. Глазером и Р.И. Тагировым. Теоретическая группа (Б.Н. Филиппов, А.П. Танкеев, В.И. Береснев, Ю.Г. Лебедев, Е.И. Раевский) решала задачи зарождения и уничтожения цилиндрических доменов и их движения в доменопродвигающих структурах. Сегодня Б.Н. Филиппов продолжает исследование структуры доменных стенок в тонких плёнках, в том числе, для целей записи информации. Динамику доменной структуры экспериментально



Участники Международного симпозиума «Нелинейные электромагнитные системы», Германия, г. Брауншвейг, 1997 г. Д.ф.-м.н. Ю.Н. Драгошанский при обсуждении доклада с проф. Тадао Нозава и Акихико Сайто из Тоттори университета Японии.

исследовали В.А. Зайкова, Ю.Н. Драгошанский, Е.Б. Хан, В.Ф. Тиунов, С.В. Жаков.

Среди активно развиваемых тем следует отметить исследования механизма наведённой магнитной анизотропии (И.Е. Старцева, В.В. Шулика, Н.В. Ершов, В.А. Лукшина, Н.В. Дмитриева), магнитной анизотропии и магнитных фазовых переходов в редкоземельных интерметаллидах (А.С. Ермоленко, А.В. Королёв, А.Г. Кучин, Е.В. Щербакова, В.И. Храбров), структуры и свойств дисперсионно-твердеющих и упорядочивающихся сплавов (Н.И. Власова, В.В. Сериков, Н.М. Клейнерман, А.Е. Ермаков, М.А. Уймин, Г.В. Иванова, Е.В. Белозеров). В настоящее время активно развивается ряд новых направлений: магнитные фазовые переходы в слоистых магнетиках (Н.В. Баранов, Е.Г. Герасимов), зонный метамагнетизм (Н.В. Мушников), нестехиометрические редкоземельные сплавы (Е.Г. Герасимов, Н.В. Мушников, А.Г. Кучин).

За время существования лаборатории и отдела получен целый ряд уникальных результатов. Так, А.В. Королёвым и А.С. Ермоленко впервые в мире было обнаружено, что монокристаллы SmCo_5 сферической формы после травления их поверхности и намагничивания до насыщения являются идеальными постоянными магнитами [14]. Значение максимального энергетического произведения у таких образцов составило 32 МГсЭ, что является теоретическим пределом для данного материала и было рекордным значением для известных в то время постоянных магнитов. Эти эксперименты наглядно демонстрировали механизм коэрцитивной силы материалов на основе соединений RCO_5 , связанный с задержкой образования и роста зародышей обратной фазы. Зародышеобразование легко осуществляется на дефектной по-

верхности образца и существенно затрудняется после удаления дефектного слоя.

Много внимания уделяется поиску новых магнитных фаз. Г.В. Ивановой и Е.В. Щербаковой при анализе фазового состава тройных сплавов редкоземельный металл-железо-ванадий (титан) была обнаружена новая фаза со структурой типа R_3Fe_{29} [15]. Эта фаза обладает значительной магнитной анизотропией и на её основе впоследствии были изготовлены постоянные магниты с высоким уровнем свойств.

Неизвестные ранее эффекты были обнаружены А.В. Королёвым, В.С. Гавико и Н.В. Мушниковым. В соединениях $\text{Sm}(\text{Fe},\text{Co})_2$ была обнаружена гигантская наведённая магнитная анизотропия и сильное квазимагнитоупругое последствие, связанные с упорядочением растворённого в образцах водорода в поле магнитоупругих деформаций решётки [16]. А.С. Ермоленко впервые наблюдал скачки намагниченности в монокристаллах $(\text{NdY})\text{Co}_5$ вдоль трудного направления намагничивания, связанные с необратимым вращением намагниченности, то есть индуцированным магнитным полем фазовым переходом 1 рода [17]. Первую теоретическую модель этого явления предложил Л.Г. Оноприенко [18], также сотрудник ИФМ. В серии работ А.С. Ермоленко, А.В. Королёва и А.Г. Кучина были изучены монокристаллы на основе RNi_5 с конкурирующей магнитной анизотропией и со взаимно перпендикулярными магнитными подрешётками, у которых наблюдаются две разные точки Кюри [19]. Материал является магнитотвёрдым вдоль одного направления и магнитомягким в перпендикулярном направлении. Из полученных в последнее время наиболее существенных результатов следует отметить обнаружение большой коэрцитивной силы при низких температурах в слоистых халькогенидах Fe_7X_8 ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}$), свидетельствующее о появлении значительного орбитального момента атомов железа (Н.В. Баранов) [20], установление механизма упорядочения в сплавах FePd через промежуточную фазу A6 (Н.И. Власова) [21], обнаружение аномального магнетизма поверхности нанокристаллических оксидов TiO_2 (А.Е. Ермаков, М.А. Уймин) [22], установление разупорядоченного магнитного состояния тербия во фрустрированном магнетике $(\text{La},\text{Tb})\text{Mn}_2\text{Si}_2$ [23].

Мировой уровень получаемых результатов, наличие в составе лабораторий высококвалифицированных специалистов и молодых активных сотрудников, приличное по современным меркам оборудование позволяют отделу магнитных материалов уверенно смотреть в будущее.

Авторы благодарны А.С. Ермоленко, А.Е. Ермакову и Н.В. Баранову за полезные обсуждения и предоставленную информацию.

Н.В. Мушников, Ю.Н. Драгошанский

Список литературы

1. Я.Г. Дорфман, И.К. Кикоин, *Физика металлов: Электрические, оптические и магнитные свойства*, Гостехиздат, Москва–Ленинград, (1933), 551 с.
2. Я.С. Шур, *ЖТФ* **8**, 1817 (1938).
3. С.В. Вонсовский, Я.С. Шур, *Магнитное дефектоскопирование корпусов артиллерийских снарядов (Дефектоскопия системы УФАН)*, Москва–Ленинград (1946), 109 с.
4. Я.С. Шур, В.Р. Абельс, *ФММ* **1**, 11 (1955).
5. С.В. Вонсовский, Я.С. Шур, *Ферромагнетизм*. Гостехиздат, Москва–Ленинград (1948), 816 с.
6. Ю.Н. Драгошанский, В.И. Пудов, Л.С. Каренина, *Изв. РАН, Сер. Физ.* **77**, 1496 (2013).
7. Ю.Н. Драгошанский. Пат. РФ №2025504 (1994); В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский, Б.Н. Филиппов, А.П. Потапов, В.В. Шулика, Пат. РФ № 2406769 (2010).
8. Я.С. Шур, Л.М. Магат, А.С. Ермоленко, Н.А. Решетников, В.С. Аверкиев, А.В. Дерягин, В.С. Бойденко, Е.В. Щербакова, *ФММ* **35**, 655 (1973).
9. А.Г. Попов, А.В. Королев, Н.Н. Щеголева, *ФММ* **3**, 100 (1990).
10. А.Г. Попов, Н.В. Кудреватых, В.П. Вяткин, Д.Ю. Василенко, Д.Ю. Брагушев, Т.З. Пузанова, Е.Г. Герасимов, *ФММ* **109**, 257 (2010).
11. А.Г. Попов, Е.В. Белозеров, В.В. Сагарадзе, Н.Л. Печеркина, И.Г. Кабанова, В.С. Гавико, В.И. Храбров, *ФММ* **102** (2), 152 (2006).
12. N.V. Mushnikov, E.G. Gerasimov, *J. Alloys and Compounds* **676**, 74 (2016).
13. А.Е. Ермаков, В.А. Баринев, Е.Е. Юрчиков, *ФММ* **54** (5), 935 (1982).
14. А.С. Ермоленко, А.В. Королев, Я.С. Шур, *Письма в ЖЭТФ* **17**, 499 (1973).
15. Ye.V. Shcherbakova, G.V. Ivanova, A.S. Yermolenko, V.S. Gaviko, *J. Alloys and Compounds* **182**, 199 (1992).
16. N.V. Mushnikov, A.V. Korolyov, V.S. Gaviko, Ye.I. Raevski, L. Pareti, *J. Appl. Phys.* **70**, 2768 (1991).
17. А.С. Ермоленко, *ФММ* **50**, 952 (1980).
18. Л.Г. Оноприенко, *ФММ* **17**, 350 (1964).
19. А.Г. Кучин, А.В. Королев, А.С. Ермоленко, *ФММ* **59**, 498 (1985).
20. N.V. Baranov, P.N.G. Ibrahim, N.V. Selezneva, A.F. Gubkin, A.S. Volegov, D.A. Shishkin, L. Keller, D. Sheptyakov, E.A. Sherstobitova, *J. Phys.: Condens. Matter* **27**, 286003 (2015).
21. N.I. Vlasova, A.G. Popov, N.N. Shchegoleva, V.S. Gaviko, L.A. Stashkova, G.S. Kandaurova, D.V. Gunderov, *Acta Mater.* **61**, 2560 (2013).
22. А.Е. Ермаков, М.А. Уймин, А.В. Королев, А.С. Волегов, И.В. Бызов, Н.Н. Щеголева, А.С. Минин, *ФТТ* **59**, 458 (2017).
23. E.G. Gerasimov, N.V. Mushnikov, P.B. Terentev, K.A. Yazovskikh, I.S. Titov, V.S. Gaviko, Rie.Y. Umetsu, *JMMM* **422**, 237 (2017).

ОТДЕЛ

материаловедения

ЛАБОРАТОРИЯ

МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

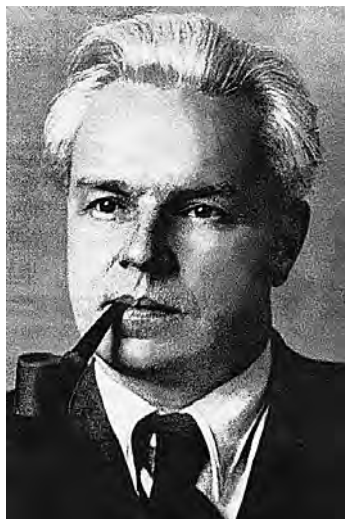
Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Макаров Алексей Викторович, заведующий лабораторией, д.т.н.
- Афанасьев Сергей Викторович, ведущий инженер
- Валиуллин Андрей Илдарович, научный сотрудник
- Вандышева Ирина Геннадьевна, ведущий технолог
- Волкова Елена Георгиевна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Гибзун Максим Сергеевич, инженер
- Гилев Николай Константинович, технолог
- Дерягин Анатолий Иванович, ведущий инженер
- Завалишин Владимир Александрович, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Загайнова Надежда Михайловна, ведущий технолог
- Заматовский Андрей Евгеньевич, ведущий электроник
- Земцова Наталия Дмитриевна, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Кабанова Ирина Геннадьевна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Катаева Наталья Владимовна, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Ключкина Марина Фаридовна, младший научный сотрудник
- Козлов Кирилл Александрович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Кочеткова Тамара Николаевна, главный специалист
- Кузнецов Андрей Робертович, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Лежнин Никита Владимирович, научный сотрудник, к.т.н.
- Литвинов Антон Викторович, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Лучко Сергей Николаевич, инженер-исследователь
- Ляшков Кирилл Андреевич, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Малинин Александр Васильевич, станочник широкого профиля 6 разряд
- Мухина Наталья Николаевна, ведущий технолог
- Печеркина Нина Леонидовна, старший научный сотрудник
- Пушин Артем Владимирович, научный сотрудник, к.т.н.
- Сагарадзе Виктор Владимирович, главный научный сотрудник, д.т.н., чл.-корр. РАН, профессор
- Самойлова Галина Викторовна, инженер-исследователь
- Стариков Сергей Анатольевич, ведущий технолог
- Сычева Тамара Ивановна, ведущий технолог
- Фризен Эдуард Николаевич, главный специалист
- Шабашов Валерий Александрович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Лаборатория механических свойств ведёт своё начало с самых первых дней основания Института физики металлов. По инициативе академика А.Ф. Иоффе согласно приказу №5 от 20 января 1932 г. по Ленинградскому физико-техническому институту из состава ЛФТИ была выделена группа №3 Уральского физико-технического института (УрФТИ), а в соответствии с первым распоряжением по УрФТИ от 26 января 1932 г. была организована группа №3 «Изучение пластической деформации металлов» под руководством М.В. Якутовича. Первыми сотрудниками группы были инженеры 1 разряда Э.С. Яковлева и М.Д. Мочалов, старший инженер М.О. Корнфельд и старший препаратор П.М. Бычкова. В 1934 г. группа № 3 была преобразована в Отдел изучения механических свойств металлов, в котором работали также практиканты В.А. Павлов, Ф.П. Рыбалко и Ф.С. Савицкий. К моменту окончательного переезда института из Ленинграда в Свердловск (1936 г.) отделы УрФТИ упраздняются и появляется Лаборатория механических явлений, которая в 1939 г. стала называться Лабораторией механических свойств металлов (и испытаний стали), в 1943 г. – Лабораторией механических свойств и испытаний металлов, в 1953 г. – лабораторией механических свойств металлов, а в 1959 г. получила своё нынешнее название – Лаборатория механических свойств.

Первым заведующим лабораторией с 1932 года был Михаил Васильевич Якутович – ученик академика Н.Н. Давиденкова. Михаил Васильевич прожил жизнь долгую (1902–1988 гг.), насыщенную, наполненную разными событиями и крупными научными свершениями. В сложные 1937–1938 гг. М.В. Якутович был временно исполняющим обязанности заместителя директора УрФТИ по научной части (после освобождения от должности



М.В. Якутович – заведующий лабораторией механических свойств в 1932–1949 гг.

Я.Г. Дорфмана приказом от 15 июня 1937 г.) и директора Института (с 1 ноября 1937 г. по 7 июня 1938 г. после снятия с должности первого директора М.Н. Михеева за «покровительство» С.П. Шубина, уличённого в принадлежности к Троцкистской оппозиции). Избежать ожидаемого ареста М.Н. Михееву удалось во многом благодаря умению Михаила Васильевича убеждать, его внутренней силе и смелости. В 1938 г. М.В. Якутовичу по совокупности работ (без защиты диссертации) была присуждена степень кандидата наук, он вошёл в состав образованного Президиума Уральского филиала АН СССР. В период с сентября 1938 по май 1943 он исполнял также обязанности учёного секретаря Института.

Нина Ивановна Чарикова (Носкова) в книге [1] даёт удивительно ёмкую характеристику первому заведующему лаборатории: «Михаил Васильевич был яркой и величественной личностью. Обладающий недюжинной физической силой, курящий свою любимую трубку, остроумный и лукавый, он всегда был центром любого собрания, семинара или конференции. Вместе с этим

он был внимателен и серьёзен при решении даже, казалось бы, малых научных проблем, подчиняя всего себя их решению. По отзыву академика В.Д. Садовского, М.В. Якутович обладал огромной эрудицией и мог дать квалифицированный ответ или консультацию практически по любому вопросу».

И не случайно, в числе других наиболее квалифицированных специалистов Академии наук М.В. Якутович был призван для создания ядерного щита страны. В 1949 г. он переведён на Уральский электрохимический комбинат (г. Новоуральск Свердловской обл.) заместителем научного руководителя, а с 1953 по 1962 гг. являлся научным руководителем комбината, где в 1955 г. стал доктором физико-математических наук, а в 1959 г. – профессором. В постановлении № 359 Президиума АН СССР об итогах и перспективах деятельности Института физики металлов от 26 апреля 1957 г. поднимался вопрос о возвращении в Институт бывшего его сотрудника д.ф.-м.н. М.В. Якутовича «с целью укрепления и развития работ по физике процессов кристаллизации». Однако в Академию наук Михаил Васильевич уже не вернулся, продолжив с 1962 г. свой славный трудовой путь в Подольском научно-исследовательском технологическом институте (Московская обл.) в качестве директора (1962–1969 гг.), заместителя директора (1969–1975 гг.), начальника лаборатории (1975–1977 гг.) и научного консультанта (1977–1987 гг.).

Михаил Васильевич внёс весомый вклад в методику измерения малых деформаций в различных сооружениях, исследования пластической деформации, разрушения и механизма рекристаллизации; разработку и совершенствование газодиффузионного метода

разделения изотопов урана; исследование свойств тугоплавких и высокопрочных материалов при высоких температурах, используемых в космической и ядерной энергетике. Руководил созданием ядерного ракетного двигателя и его испытанием на Семипалатинском полигоне. За достижения в области разделения изотопов, атомного материаловедения и механики отмечен многими правительственными наградами: Государственными премиями СССР (Сталинскими премиями 1 степени за 1951 и 1954 гг.), Ленинской премией за 1958 г., ордена Ленина (1951, 1954 гг.), Трудового Красного Знамени (1953, 1954 гг.) и «Знак Почёта» (1945, 1962, 1971 гг.).

М.В. Якутович возглавлял лабораторию механических свойств в первый период её развития – с 1932 по 1949 гг. С самого начала этого периода научные исследования лаборатории под его руководством сосредоточились в 3-х направлениях: 1) выяснение механизма двойникования в кристаллах (Яковлева Э.С.) [2,3]; 2) выяснение механизма пластической деформации (Яковлева Э.С., Рыбалко Н.П.) [4]; 3) выяснение механизмов кристаллизации и рекристаллизации металлов и сплавов (Колесников Г.Н., Моисеев А.И., Яковлева Э.С.) [5]. Налаживались связи с ВИЗом и УЗТМ. Например, в 1938 г. одна из основных тем лаборатории была направлена на улучшение технических характеристик трансформаторной стали путём деформации и последующей рекристаллизации, изучались механические свойства при высоких и низких температурах чистых металлов, кристаллизующихся в разных системах, а тема «Разработка схемы процесса и агрегата для непрерывного получения стали и чугуна» хоть и не была связана с основным направлением работы лаборатории, но ставила вопрос, имеющий большое народно-хозяйственное значение. В 1939 г. в лаборатории проводились также исследования по темам № 14 «Связь между структурой некоторых/типичных/бинарных сплавов и механическими свойствами в широком диапазоне температур», № 15 «Изменение скорости фришевания чугуна в струе металла путём воздействия газовой фазы», № 16 «Применение структурного метода для измерения остаточных напряжений в изделиях УЗТМ», № 18 «Влияние малых количеств нерастворимых в твёрдом состоянии присадок на величину зерна и механические свойства металлов».

В отчёте о работе Института металловедения, металлофизики и металлургии УФАН СССР за 1-е полугодие 1941 г. отмечено внедрение в промышленность усовершенствованной аппаратуры для измерения остаточных напряжений в заготовках струнным методом (аппаратура изготовлена в мастерских УФАН и сдана лаборатории УЗТМ; руководитель к.ф.-м.н. М.В. Якутович, исполнитель м.н.с. Д.Г. Курносов). В этой работе, в продолжение исследований, начатых Михаилом Васильевичем в ЛФТИ под руководством профессора Н.Н. Давиденкова в 1926–1932 гг. в Ленинграде, развит до высокой степени совершенства акустический (струнный) метод измерения малых деформаций.



Э.С. Яковлева

С первых дней основания лаборатории важнейшее место в решении многих научных и методических вопросов заняла Эмилия Сергеевна Яковлева, которая проработала в лаборатории с 1932 г. до выхода на пенсию в 1976 г. В 30-ые годы она опубликовала ряд статей по кинетике механического двойникования кристаллов (совместно с М.В. Якутовичем) [2, 3], обзор по методам выращивания монокристаллов из расплава и путём рекристаллизации [5], по методам определения ориентировок кристаллов [6] и текстур в крупнокристаллическом металле [7]. В 1936 г. первой в лаборатории Э.С. Яковлева защитила кандидатскую диссертацию на тему «Скачкообразная деформация кристаллов цинка», в которой была подтверждена точка зрения Н.Н. Давиденкова и опровергнуто представление Орована о процессе скачкообразной деформации [4].

В военные годы Э.С. Яковлева работала по заданию оборонного завода над выяснением причин брака вкладышей авиационных моторов и в 1946 г. была награждена медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне». А в 1954 г. трудовая деятельность Эмилии Сергеевны была отмечена орденом Ленина.

С момента образования лаборатория испытывала острый недостаток в лабораторном оборудовании, и поэтому вопросам создания испытательных установок и методик уделялось самое пристальное внимание. Ещё в 1940 г. В.С. Аверкиевым, Г.Н. Колесниковым, В.А. Павловым и М.В. Якутовичем была разработана и испытана установка для растяжения проволоки в широком диапазоне температур и скоростей деформации [8], которая в то время на десятилетие опередила западные варианты подобных установок (фирмы «Instron»). В протоколе № 5 заседания учёного совета Института физики металлов от 20 декабря 1945 г. по лаборатории механических свойств металлов отмечалось: «Необходимо пополнить лабораторию современными машинами для испытания механических свойств металлов». (Примечательно, что эта задача остаётся остро актуальной и в наши дни). В первые послевоенные годы в лаборатории создаётся аппаратура для определения ударной вязкости тонкого листового материала [9] и простой упругий динамометр к машине на кручение [10].

В сборнике работ, посвящённых пятидесятилетию Института (1932–1947 гг.) [11] сказано: «Лаборатория по изучению механических свойств металлов и сплавов под руководством к.ф.-м.н. М.В. Якутовича достигла существенных успехов в области изучения механизмов и кинетики пластической деформации металлов и сплавов, по изучению механизма рекристаллизации металлов, по разработке методики и аппаратуры для измерения остаточных напряжений в металлических изделиях и ... для определения механических свойств металлов в широком

диапазоне температур и скоростей деформирования. Благодаря успехам в указанных областях исследований лаборатории удалось решить ряд практически важных задач, а именно: 1) установлена рецептура снижения потерь в трансформаторной стали в полтора раза путём холодной прокатки и рекристаллизации; 2) разработан акустический метод и аппаратура для измерения предела упругости стальной проволоки; 3) разработан и внедрён на УЗТМ струнный метод измерения остаточных напряжений в поковках и отливках».

После перехода М.В. Якутовича в атомную отрасль лабораторию механических свойств металлов возглавил Георгий Николаевич Колесников, который стал **вторым заведующим лабораторией** на период с 1949 по 1951 г. В точности, как и первый заведующий, Г.Н. Колесников в 1930 году окончил обучение в Ленинградском политехническом институте. В марте 1932 г. был принят на работу в УрФТИ в группу по изучению пластической деформации металлов. Экспериментальному и теоретическому исследованию именно этой проблемы и была посвящена большая часть его научной работы. Несколько работ связаны с конструированием экспериментальной аппаратуры [8]. В годы войны занимался решением проблем по газовому хромированию. В 1946 г. Георгий Николаевич защитил в Ленинградском физико-техническом институте АН СССР кандидатскую диссертацию по физико-математическим наукам на тему «Пластическая деформация монокристаллов алюминия в первый момент после приложения нагрузки». В 1953 г. он переводится из Академии наук в Уральский государственный университет на должность доцента кафедры экспериментальной физики, где в полной мере проявился его талант педагога-воспитателя. Лекции он читал просто и интересно. Умер Георгий Николаевич в 1981 г. в возрасте 76 лет. На прощальную панихиду пришли сотрудники ИФМ во главе с академиком С.В. Вонсовским.

Третьим заведующим лабораторией на продолжительный период с 1951 по 1982 гг. становится Виктор Алексеевич Павлов. После окончания в 1936 г. Томского университета он направляется на Урал в УрФТИ, где начинается его научная деятельность под руководством сначала М.В. Якутовича, а позднее – К.А. Малышева. Будучи с 1937 года аспирантом по специальности «механические свойства металлов», Виктор Алексеевич выполнил свои первые исследования по воздействию на структуру и свойства стали условий нагрева в электромагнитном поле. Завершению диссертации помешала война. С 1941 по 1944 г. Виктор Алексеевич участвует в боевых действиях на Карельском фронте, награжден орденом Красной Звезды и медалями.

Обращаясь к военным годам, следует навсегда сохранить светлую память о не вернувшемся с фронтов Великой Отечествен-



Г.Н. Колесников – заведующий лабораторией механических свойств в 1949–1951 гг.



Виктор Павлов в Томском Госуниверситете



Состав штаба артиллерийского батальона во главе с начальником штаба капитаном В.А.Павловым (первый ряд, справа), 1945 г.

ной войны Григории Алексеевиче Казанцеве, формовщике, технике-литейщике лаборатории механических свойств.

В 1945 г. по ходатайству Президиума АН СССР Виктор Алексеевич Павлов был демобилизован и приступил к работе младшим научным сотрудником в лаборатории механических свойств и испытаний металлов ИФМ УФАН СССР. В 1948 г. В.А. Павлов защищает кандидатскую диссертацию на тему «Влияние малорастворимых примесей на процесс рекристаллизации свинца». Занимается изучением вопросов прочности и пластичности металлов и сплавов, природы вязкого разрушения, разрабатывает основы физической теории прочности и жаропрочности. Результаты этих исследований обобщены в монографии «Физические основы пластической деформации металлов» (1962 г.) [12], которая была высоко оценена научным сообществом и выдвинула В.А. Павлова в число ведущих металлофизиков страны.

После защиты докторской диссертации в 1963 г. он вновь обращается к фундаментальным физическим проблемам, круг которых необычай-

но широк: пластичность и прочность твердых тел в широком диапазоне температур и скоростей деформации, роль межатомных сил связи и искажений кристаллической решетки в формировании прочностных свойств сплавов, динамическое поведение и структура дислокаций, дислокационный механизм низкотемпературной и высокотемпературной деформации, физические основы создания жаропрочных сплавов, влияние малых примесей на прочность, пластичность и ползучесть металлов и сплавов.

В.А. Павлов инициирует и возглавляет исследования по разработке радиационноустойчивых реакторных материалов, обладающих повышенной работоспособностью в условиях ядерного облучения, а также по исследованию сильной пластической деформации и аморфизации металлов. Результаты этих исследований представлены в обзоре «Аморфизация структуры металлов и сплавов с предельно высокой степенью пластической деформации» [13]. Особое внимание уделяется также вопросам проч-

ности и пластичности тугоплавких металлов и сплавов с ОЦК-решёткой. Обобщением цикла указанных работ явилась вторая капитальная монография «Физические основы холодной обработки ОЦК-металлов и сплавов» (1978 г.) [14].

Наряду с академическими исследованиями доктор физ.-мат. наук профессор В.А. Павлов плодотворно сотрудничал с Первоуральским новотрубным заводом, с научным отделом Белоярской атомной электростанции и другими предприятиями страны. До конца своей трудовой деятельности в 1993 г. являлся бессменным организатором Всесоюзных научных конференций по физике прочности и пластичности, которые проводились на базе Института физики металлов. С начала издания в 1955 г. академического журнала «Физика металлов и материаловедение» Виктор Алексеевич неизменно был членом редакционной коллегии журнала ФММ.

Во второй период развития лаборатории (1950–1981 гг.) число её сотрудников неуклонно росло. В исследованиях влияния малых примесей на структуру и механические свойства металлов и сплавов наряду с Э.С. Яковлевой участвуют М.Г. Гайдуков и пополнившие ряды лаборатории в 1955 году выпускники физического факультета Уральского госуниверситета Н.И. Носкова и В.И. Сюткина, которые со временем стали ведущими сотрудниками лаборатории – докторами наук. Михаил Григорьевич Гайдуков в 1952 г. защищает кандидатскую диссертацию на тему «Влияние пластической деформации на превращение аустенита в мартенсит».

Изучение ползучести жаропрочных ОЦК и ГЦК материалов под руководством В.А. Павлова проводят М.Г. Гайдуков, Н.И. Носкова, В.И. Шалаев, В.М. Алябьев и Т.Н. Кочеткова. В 1978 г. состоялась защита Владимиром Михайловичем Алябьевым кандидатской диссертации на тему «Исследование длительной прочности железа». Сильными пластическими деформациями занимаются А.И. Дерягин, В.А. Завалишин и Н.Л. Печеркина. Анатолий Иванович Дерягин в 1981 г. защищает диссертацию на степень кандидата физ.-мат. наук на тему «Влияние пластической деформации на магнитные свойства переходных парамагнитных металлов».

Влияние дефектов упаковки на прочность и пластичность металлов и сплавов изучают Н.И. Носкова, Н.Ф. Вильданова, И.А. Перетурина, В. Долгополов, С.А. Фризен, Э.Н. Фризен. В разработке улучшенных радиационных материалов активное участие принимают В.И. Шалаев, В.М. Алябьев, С.С. Лапин, Т.Н. Кочеткова, В.Н. Кузнецов, а также Е.В. Дусье и И.Б. Ткаченко. Над выяснением роли винтовых дислокаций и границ зёрен в прочности, пластичности и сопротивлении ползучести ОЦК металлов и сплавов работают Н.Л. Печеркина, И.А. Перетурина,



В.А. Павлов – заведующий лабораторией механических свойств в 1951–1981 гг.

Н.И. Носкова, Н.Ф. Вильданова и А.И. Журавлева. В 1965 г. Нина Ивановна Чарикова (Носкова) защищает диссертацию на степень кандидата физико-математических наук по чистым металлам и сплавам на основе никеля и алюминия. Совместно с Ниной Ивановной В.А. Павлов занимается также проблемой аморфных материалов. Как было установлено, аморфные состояния металлических материалов можно получить при многократных фазовых превращениях в твёрдом состоянии, под воздействием потоков высокоэнергетических частиц – нейтронов, электронов или ионов, при определённых способах кристаллизации [13].

Ещё одно важное научное направление лаборатории, которое начало активно развиваться в 50–70-е годы, связано с изучением упорядочения в металлах и сплавах и влияния его на механические и физические свойства. Первая кандидатская диссертация на эту тему была защищена в лаборатории уже в 1953 г. (М.Д. Мочалов «Влияние состава и степени порядка на гальваномагнитные свойства упорядочивающихся сплавов»). Валентина Ивановна Сюткина, сменив первоначальную тему исследований прочностных свойств никелевых сплавов в зависимости от их структуры, с 1962 г. под руководством Э.С. Яковлевой изучает особенности деформирования, упрочнения и доменной структуры сплавов системы золото-медь, упорядочивающихся с переходом к тетрагональной кристаллической решётке, а в 1967 г. защищает кандидатскую диссертацию «Механизм деформации и упрочнения сплавов, изменяющих симметрию решётки при упорядочении». Над проблематикой атомно-упорядоченных сплавов работают также Н.Н. Сюткин, П.Н. Сюткин, Л.Н. Буйнова, Б.В. Адрианов-



В.А. Павлов на редколлегии журнала ФММ



1978 г.: 1 ряд: Э.С. Яковлева, В.А. Павлов, Н.И. Носкова; 2 ряд: В.П. Кетова, В.И. Сюткина, М.Г. Гайдуков, Н.Л. Печеркина, М.Г. Всехвальных, В.М. Алябьев, И.А. Перетурин, Ю.И. Филиппов, Т.Н. Кочеткова, В.И. Шалаев, А.И. Дерягин

ский, Л.И. Яковенкова, А. Телегин, Е. Тейтель. Людмила Ивановна Яковенкова защищает кандидатскую диссертацию «Особенности дислокационной структуры и упрочнение упорядоченных сплавов» (1978 г.).

В этот же период состоялись защиты ещё двух диссертаций, выполненных на цветных и благородных металлах: Ниной Федоровной Вильдановой «Влияние термической обработки и ультразвукового воздействия на структуру и свойства литых алюминий-магниевого сплава» (1979 г.) и Виктором Исаевичем Шалаевым по сплавам платиновой группы (1980 г.).

В годы заведования В.А. Павловым происходит оснащение лаборатории новым оборудованием, в частности, установками для испытаний на длительную прочность и ползучесть при температуре до 1200 °С. Примерно в 1980–83 гг. В.И. Шалаевым, Л.П. Алексеевым и В.А. Завалишиным спроектирован и собран в институтской мастерской пульт автоматизации измерения и регистрации температур печей, который позже (в середине 2000-х) был дополнен компьютерной регистрацией и в круглосуточном режиме (кроме летнего перерыва) работает в термозале по настоящее время (эти длительные ответственные эксперименты добросовестно выполняют Т.Н. Кочеткова, В.А. Завалишин, И.Г. Вандышева, Н.М. Загайнова, Н.Н. Мухина и Т.И. Сычева). Помимо пульта сконструированы и работают полдюжины термостатов поддержания постоянной температуры холодных спаев термопар. На рубеже восьмидесятых в лаборатории проводились также работы по вводу в эксплуатацию новых высокотемпературных вакуумных криповых ис-



11 декабря 1981 г.: 1 ряд: Т.Н. Кочеткова, А.И. Журавлева, Н.И. Носкова, М.Г. Гайдуков, В.А. Павлов, Н.А. Петрова, Э.Н. Фризен. 2 ряд: В.А. Баранов, В.И. Шалаев, В.А. Завалишин, В.М. Алябьев, Л.П. Алексеев, А.И. Дерягин, В.Н. Кузнецов, Н.Л. Печеркина, С.В. Морозов, И.А. Перетурина, Н.К. Гилев, Н.Ф. Вильданова, Ю.И. Филиппов, Л.Е. Карькина, Е.Л. Бондаренко, Л.А. Кульба, В.П. Кетова

пытательных машин с участием В.И. Шалаева, Л.П. Алексеева, В.М. Алябьева, В.А. Завалишина, и автоматизации измерения и регистрации температур. Полученные вакуумные испытательные машины оказались очень «сырыми», и по ходу освоения постоянно выявлялись ошибки проектировщиков и изготовителей. Как пример, после сборки и включения машины тут же «вылетали» предохранители блока управления двигателями.

Проектировщики не учли, что пусковые токи двигателей в десятки раз превышают рабочие, и поставили «быстрые» предохранители. Ситуацию разрешили забавно. Сверху машины смонтировали кожух с тремя мощными лампочками (по 200 ватт на каждой фазе). Лампочки вспыхивали в момент пуска двигателей, но спасали предохранители.

Четвёртым заведующим лабораторией в январе 1982 г. становится Виктор Владимирович Сагарадзе, который возглавлял лабораторию 32 года – по май 2014 г. После окончания в 1963 г. Уральского политехнического института (УПИ, ныне УрФУ) в г. Свердловске Виктор Владимиро-



У вакуумных машин, 1980 г.
(М.Г. Гайдуков, В.И. Шалаев и В.А. Павлов)

вич возвращается в родной город Н. Тагил на «Уралвагонзавод», где работает в центральной заводской лаборатории инженером и начальником лаборатории металловедения (1966–1968 гг.). В 1966 г. поступает в заочную аспирантуру ИФМ УрО РАН, а в 1968 г. переходит уже на постоянную основу в лабораторию физического металловедения ИФМ, возглавляемую членом-корреспондентом АН СССР Виссарионом Дмитриевичем Садовским. В группе аустенитных сталей, руководимой проф., д.т.н. Константином Александровичем Малышевым, основной научной задачей В.В. Сагарадзе становится изучение структурных механизмов упрочнения сталей аустенитного класса и разработка на этой основе новых высокопрочных аустенитных немагнитных сталей для деталей ответственного назначения. В данных материалах особенно остро нуждалась электротехническая промышленность и морской флот. В 1970 г. Виктор Владимирович защищает кандидатскую диссертацию по металловедению «Фазовый наклёп нержавеющей аустенитных сталей», а в 1980 г. – докторскую диссертацию по физике твёрдого тела «Закономерности формирования структуры и свойств высокопрочных немагнитных сталей в результате гамма-альфа-гамма-превращений».

Один из выдающихся учеников академика В.Д. Садовского и профессора К.А. Малышева, В.В. Сагарадзе вместе с учениками и коллегами разработал новые оригинальные научные подходы к созданию широкого ряда сталей и сплавов со специальными свойствами: жаропрочных и радиационно-стойких реакторных сталей нового поколения, упрочняемых оксидами иттрия и титана, фазонаклёпываемых сталей с высокой усталостной прочностью, цементуемых износостойких высокопрочных немагнитных сталей, неферромагнитных корпусных сталей с высоким сопротивлением коррозионному растрескиванию для специального судостроения, дисперсионно-твердеющих сталей с эффектом памяти формы, износостойких антифрикционных сталей, сплавов с регулируемым коэффициентом линейного расширения. С его именем связано введение в металловедение таких новых понятий, как гамма-мартенсит, магнитодисперсионное твердение, атомное расслоение твёрдых растворов на основе железа при холодной деформации. Внёс важнейший вклад в изучение механизма обратного мартенситного превращения, в разработку научных принципов объёмного наноструктурирования метастабильных сталей в результате циклических фазовых превращений, в определение структурного механизма аномальных процессов низкотемпературного растворения вторых фаз при интенсивной пластической деформации.

Эти работы получили самую высокую оценку научной общественности. В 1984 г. В.В. Сагарадзе вместе с К.А. Малыше-



В.В. Сагарадзе – заведующий лабораторией механических свойств в 1982–2014 гг.

вым и А.И. Уваровым был награждён академической премией им. П.А. Аносова за первую в мировой практике монографию по фазовому наклёпу «Фазовый наклёп аустенитных сплавов на железоникелевой основе» (соавторами монографии являлись также сотрудники лаборатории механических свойств Илья Петрович Сорокин и Наталия Дмитриевна Земцова) [15], а в 2006 и 2010 гг. стал лауреатом премии УрО РАН имени академика В.Д. Садовского. Воспитанные Виктором Владимировичем молодые сотрудники группы аустенитных сталей И.И. Косицына, Н.А. Терещенко, Е.И. Ануфриева и Н.Л. Черненко в 1986 г. были удостоены Премии Ленинского комсомола в области науки и техники за работу «Стареющие аустенитные сплавы с регулируемой стабильностью – новая группа высокопрочных материалов». В 1999 г. В.В. Сагарадзе был награждён медалью ордена «За заслуги перед отечеством» II степени, в 2009 г. получил звание «Заслуженный деятель науки РФ» и возглавил отдел материаловедения, включающий 3 лаборатории – механических свойств, физическо-металлоупрочнения и цветных сплавов. Выражением высокого профессионального уровня и общего признания в металлургии явилось избрание Виктора Владимировича в 2011 г. член-корреспондентом РАН и издание в 2013 г. (совместно с А.И. Уваровым) фундаментального труда – монографии «Упрочнение и свойства аустенитных сталей» [16]. Многие годы Виктор Владимирович – член редколлегии журналов ФММ и Металлофизика (Украина), заместитель председателя Совета РАН по радиационной физике твёрдого тела. Под руководством В.В. Сагарадзе стали кандидатами наук 18 человек (Е.И. Щедрин, Ю.А. Васева, В.А. Шабашов, И.И. Косицына, Е.И. Старченко, Н.А. Терещенко, С.В. Морозов, С.С. Лапин, Т.М. Лапина, В.А. Завалишин, И.Г. Кабанова, Ю.Р. Янус, А.В. Козлов, К.А. Козлов, И.А. Портных, С.А. Аверин, С.А. Стариков, А.И. Валиуллин) и докторами – 3 сотрудника (В.А. Шабашов, И.И. Косицына, А.В. Козлов).

В восьмидесятые и последующие годы в лаборатории активно набирает обороты направление по разработке высокопрочных упорядочивающихся сложнелегированных сплавов на основе благородных металлов (Al–Cu, Pd–Cu и др.), обладающих высокой контактной стойкостью и прочностью, для систем управления и навигационных устройств. Выяснением механизмов упорядочения и изучением свойств сплавов на основе благородных металлов занимались сотрудники лаборатории В.И. Сюткина, Н.Д. Земцова, А.Ю. Волков, И.Г. Кабанова, И.П. Сорокин, И.А. Перетурина, Н.Н. Сюткин. Валентина Ивановна Сюткина в 1982 г. защищает докторскую диссертацию «Разработка высокопрочных упорядоченных сплавов на основе золота», которая была признана одной из двух лучших работ по физиче-



В.И. Сюткина

скому металлургии, защищённых в СССР в 1982 г., а в 1983 г. заслуги Валентины Ивановны отмечены орденом «Знак Почёта». Разработки В.И. Сюткиной с коллегами и учениками уникальны. Они открыли возможность для создания ряда новых высокопрочных золотомедных сплавов для приборостроения, в т. ч. для слаботочных скользящих контактов с пределом текучести 1000–1200 МПа и временным сопротивлением 1500 МПа без присущей сплавам на основе Cu_3Au хрупкости в упорядоченном состоянии. Созданы также новые высокопрочные контактные сплавы на основе палладия с содержанием золота не более 18–20 масс. %, новые ювелирные сплавы на основе золота и палладия с улучшенными литейными и антикоррозионными свойствами. Предложены технологически простые термообработки, позволяющие получить в упорядоченных сплавах на основе палладия и золота сочетание высоких прочностных свойств, большой пластичности и низкого электросопротивления при меньшей стоимости сплавов, поскольку в них отсутствует платина. Благодаря этим работам лаборатория продолжительное время имела тесные связи со Свердловским заводом ОЦМ. На основе фундаментальных исследований были разработаны новые методы упрочнения упорядоченных сплавов, представленные в монографии [17], опубликованной В.И. Сюткиной в соавторстве с Б.А. Гринберг в 1985 г. Эти методы легли в основу разработки новых высокопрочных и износостойчивых материалов для слаботочных контактов.

Сотрудник группы В.И. Сюткиной Алексей Юрьевич Волков защищает в 1994 г. кандидатскую диссертацию «Структура и свойства упорядоченных сплавов системы Cu–Au–Pd», а в 2004 г. – докторскую диссертацию «Эволюция микроструктуры, кинетика фазовых превращений и их влияние на деформационное поведение упорядоченных сплавов золота и палладия». Проблема упрочнения упорядоченных сплавов решена созданием в них композитоподобной структуры путем упорядочения после пластической деформации. Впоследствии А.Ю. Волков возглавил лабораторию прочности ИФМ.

В 1987 г. состоялась защита диссертации (по изучению алюминидов титана) на соискание степени кандидата физ.-мат. наук Лидией Евгеньевной Карькиной.

Под руководством В.В. Сагарадзе выполняются приоритетные разработки научных принципов объёмного наноструктурирования метастабильных сталей в результате циклических мартенситных $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$ -превращений с размножением ориентировок γ -фазы (в соответствии с ориентационными соотношениями Курдюмова–Закса) до 576 в каждом исходном аустенитном зерне [18]. Формирование наноразмерных кристаллов аустенита даёт возможность, в частности, в 1,5–2 раза



А.Ю. Волков



Н.И. Носкова (Чарикова)

повысить предел текучести безуглеродистого мартенсита, а также создавать сплавы с регулируемым в широких пределах коэффициентом термического расширения [16].

Нина Ивановна Носкова (Чарикова) активно развивает направление, связанное с изучением дефектов и прочности монокристаллов и квазикристаллов, структуры и свойств нанокристаллических многофазных и аморфных сплавов. В 1988 г. защищает докторскую диссертацию на тему «Влияние энергии дефектов упаковки на дислокационный механизм деформации металлов и сплавов», а в 1995 г. публикует монографию «Дефекты и деформация монокристаллов» [19]. Под её руководством Елена Георгиевна Волкова подготовила и защитила в 1997 году кандидатскую диссертацию «Структура и свойства нанокристаллических сплавов на основе Fe, Co, Pd». Большое внимание Нина Ивановна уделяет тематике, связанной с созданием нанокристаллических металлов и сплавов в результате больших пластических деформаций и кристаллизации металлических стекол. В 2008 г. в соавторстве с Р.Р. Мулюковым выходит её монография «Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы» [20].

Нина Ивановна заслужила всеобщее признание научной общественности не только своими научными достижениями, но и как многолетний организатор международных конференций «Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов». На этом поприще у неё и, соответственно, у лаборатории механических свойств устанавливаются тесные творческие связи с научными школами Томска (академика В.Е. Панина, профессор Э.В. Козлова и Н.А. Коневой), Ленинграда – С. Петербурга (профессора В.А. Лихачева), Уфы (чл.-корр. РАН Р.Р. Мулюкова), Новокузнецка (профессора В.Е. Громова).

Начиная с восьмидесятых годов по инициативе В.В. Сагарадзе в лаборатории разворачиваются обширные экспериментальные исследования, направленные на создание составов и методов обработки новых аустенитных сталей и сплавов с улучшенными конструкционными и функциональными свойствами. Указанные научно-исследовательские разработки проводятся на основе углубленного изучения фазовых превращений и реализации всего спектра механизмов упрочнения аустенита. В результате предложены: различные неферромагнитные высокопрочные аустенитные стали, обладающие высокой износостойкостью, пластичностью, усталостной прочностью и сопротивлением коррозионному растрескиванию, для энергетических машин и неферромагнитных корпусов; аустенитные стали (никелевые, марганцевые, азотсодержащие) с твердорастворным упрочнением; упрочняемые наноразмерными

частицами аустенитные стали, в которых реализуется интерметаллидное, карбидное, карбонитридное, карбидо-интерметаллидное упрочнение и упрочнение нанокислородами; метастабильные аустенитные стали, стойкие против усталостного разрушения; высокопрочные технологичные ферромагнитные стали с прямоугольной петлей гистерезиса для скоростных гистерезисных двигателей. Установлены возможности упрочнения аустенитных сталей пластической деформацией и старением, ударными волнами и комбинированными обработками, в результате прямого и обратного мартенситных превращений [18]. Обоснованы поверхностное упрочнение и повышение износостойкости аустенитных сталей с помощью контролируемого мартенситного превращения, азотирования, цементации, образования σ -фазы, легирования азотом. Совместно с д.т.н. Л.Г. Коршуновым и Н.Л. Черненко из лаборатории физического металловедения выполнены пионерские работы по созданию антифрикционных (с рекордно низким для сталей коэффициентом трения) марганцевых аустенитных сталей с ϵ -ГПУ-мартенситом. Результаты исследований обобщены в монографиях [16, 21–23].

Проведению экспериментальных работ способствует оснащение лаборатории в 80-х годах современным на тот период времени оборудованием из ГДР для проведения механических испытаний (машина для статических испытаний, маятниковый копер, установка для испытаний на усталость по схеме изгиб при вращении) и электронно-микроскопических исследований тонких фольг. Полученный в 1986 г. электронный просвечивающий микроскоп



Конец 90-х гг.: 1 ряд: А.И. Валиулин, С.В. Косицын, И.П. Сорокин, В.И. Сюткина, И.А. Перетурина, В.В. Сагарадзе, Н.И. Носкова, Н.Д. Земцова, Т.Н. Кочеткова, Н.И. Печеркина; 2 ряд: А.И. Дерягин, С.А. Стариков, В.А. Абраменко, В.А. Завалишин, А.В. Литвинов, Н.Ф. Вильданова, В.А. Шабашов, И.И. Косицына, В.П. Кетова, И.Г. Вандышева, Т.П. Васечкина, А.Г. Мукосеев, Е.Г. Волкова, Н.В. Катаева, И.Г. Кабанова, В.М. Колосков, Э.Н. Фризен, А.Р. Кузнецов

JEM 200CX продолжает верой и правдой служить всему Институту физики металлов уже более 30 лет благодаря заботе сотрудников лаборатории механических свойств и, в первую очередь, Э.Н. Фризену, Б.С. Варгина и ответственных за микроскоп в последние годы С.В. Афанасьева, Н.В. Катаевой и Е.Г. Волковой. Возможности проведения механических испытаний были существенно улучшены лишь в 2012 г., когда в лаборатории была размещена новая электромеханическая установка Инстрон 5982, оснащённая температурной камерой (диапазон температур испытаний от -160 до $+360$ °С) и высокотемпературной (до 1200 °С) печью.

В 1986 г. кандидатские диссертации защищают Ирина Геннадьевна Кабанова «Структурные и кристаллографические особенности ОЦК-ГЦК превращений в высоколегированных сталях с мартенситной и ферритной матрицами» и Ирина Игоревна Косицына (по высокопрочным аустенитным сталям).

Многие исследования выполняются совместно с ведущими научными организациями страны. В частности, значительный интерес вызвали работы совместно с ЦНИИ КМ «Прометей» (С. Петербург), имеющие отношение к анализу коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) аустенитных сталей, упрочняемых карбидами и нитридами. Коррозионное растрескивание в металлах и сплавах изучают В.В. Сагарадзе, Ю.И. Филиппов, Т.П. Васечкина, Н.Л. Печеркина, Н.К. Гилев. В 2004 г. была опубликована монография «Коррозионное растрескивание аустенитных и ферритоперлитных сталей» [24]. Для исследования процесса КРН в лаборатории до последнего времени используется сконструированная В.А. Завалишиным ещё в 1985 г. установка для измерения акустической эмиссии (АЭ) с автоматической записью результатов.

Большое внимание уделяется исследованиям структуры и свойств сплавов урана [25] при ударно-волновом воздействии, которые выполняются Н.Л. Печеркиной, И.Г. Кабановой, В.В. Сагарадзе, В.А. Шабашовым, Н.В. Катаевой в тесном взаимодействии с сотрудниками ВНИИТФ Ю.Н. Зуевым, А.В. Павленко и др. (г. Снежинск). На сплавах U-Mo обнаружено явление структурной наследственности, которое впервые нашли и исследовали академик В.Д. Садовский и профессор К.А. Малышев на сплавах железа.

Важнейшим направлением исследований лаборатории становится изучение структурных и фазовых превращений при экстремальных внешних воздействиях в металлических материалах (сильная пластическая деформация, высокие давления, ударно-волновое нагружение, температура, радиация, облучение высокоэнергетическими частицами, агрессивная среда). Над этими вопросами работают В.В. Сагарадзе, В.А. Шабашов, С.В. Морозов, А.И. Дерягин, В.А. Завалишин, Н.Д. Земцова, Н.В. Катаева, А.Г. Мукосеев, Н.Л. Печеркина, А.Р. Кузнецов, С.А. Стариков, Н.Ф. Вильданова, А.В. Литвинов, К.А. Козлов, А.Е. Заматовский.



2007 г.: 1 ряд: И.П. Сорокин, А.И. Дерягин, В.А. Завалишин, В.В. Сагарадзе, Н.И. Носкова, Н.Д. Земцова, Т.Н. Кочеткова. 2 ряд: В.И. Корабель, В.М. Алябьев, В.П. Кетова, Н.Ф. Вильданова, И.И. Косицына, Т.М. Лапина, И.Г. Вандышева, Н.В. Катаева, Е.Г. Волкова. 3 ряд: С.С. Лапин, Н.Л. Печеркина, В.А. Шабашов, Э.Н. Фризен, Ю.И. Филиппов, И.А. Перетурина, А.В. Литвинов, Л.А. Кульба, Н.К. Гилев, С.В. Косицын

Сотрудники лаборатории фактически стали инициаторами активных исследований в стране и за рубежом по низкотемпературным аномальным диффузионным фазовым превращениям, связанным с деформационной генерацией точечных дефектов [16, 26–28]. В результате изучения механизмов пластической деформации обнаружено аномальное низкотемпературное (77 – 300 К) деформационное растворение различных интерметаллидов, карбидов, нитридов и оксидов в сплавах при взаимодействии дислокаций с частицами [27]. Это позволяет прогнозировать составы новых дисперсионно-твердеющих износостойких сплавов. Впервые обнаружено явление концентрационного атомного расслоения твёрдых растворов на основе железа при сильной холодной деформации, связанное с генерацией и миграцией точечных дефектов деформационного происхождения на стоки-границы зёрен; дано математическое описание деформационно-индуцированной сегрегации легирующих элементов [16, 26, 28]. Сергей Владимирович Морозов в 1992 г. защищает диссертацию «Растворение дисперсных частиц при холодной пластической деформации Fe–Ni аустенитных сплавов».

В 2002 г. проходит защита кандидатской диссертации Владимира Александровича Завалишина «Перераспределение легирующих элементов и изменение магнитных свойств при интенсивной холодной деформации Fe–Cr–Ni аустенитных сплавов» [26]. Вы-

полнению работы способствовало проведенная Дерягиным А.И. и Завалишиным В.А. в 1985–1988 гг. модернизация и метрологическая аттестация магнитометрической установки МВ-2 (магнитные весы Фарадея). Позднее в 2010–2011 гг. В.А. Завалишин разработал и собрал силовой блок (мощность 5кВт) управления током магнита, а в 2012 г. магнитометр МВ-2 был компьютеризован. Измерения намагниченности в несколько раз облегчились и ускорились (ранее за рабочий день можно было измерить полевую зависимость 1–2 образцов, теперь 5–6). А последняя защита диссертации по рассматриваемому направлению состоялась в 2017: Стариков Сергей Анатольевич, тема «Деформационно-индуцированная сегрегация в аустенитных сплавах».

В разработке радиационных материалов (экономно легированных радиационно-стойких нержавеющей сталей) [16, 29, 30] с высоким сопротивлением вакансионному распуханию для оболочек тепловыделяющих элементов и других узлов реакторов деления и синтеза совместно с отделом Б.Н. Гощицкого и группой В.Л. Арбузова участвуют сотрудники лаборатории механических свойств В.В. Сагарадзе, В.А. Павлов, В.А. Шабашов, В.И. Шалаев, В.М. Алябьев, С.С. Лапин, Т.М. Лапина, Т.Н. Кочеткова, В.Н. Кузнецов, Е.В. Дусье, И.Б. Ткаченко, Н.Ф. Вильданова, Н.В. Катаева, К.А. Козлов, А.Р. Кузнецов. Исследуется упрочнение и радиационная стойкость аустенитных сталей при нейтронном облучении. Впервые экспериментально и теоретически устанавливается единая природа аномальных низкотемпературных фазовых превращений в сплавах Fe–Ni(Cr)–Ti (низкотемпературное атомное расслоение и растворение дисперсных фаз в сталях и сплавах при 200–400 К) в процессе холодной деформации или облучения высокоэнергетическими частицами, что связано с образованием и диффузией точечных дефектов радиационного или деформационного происхождения. Предложен новый подход к созданию жаропрочных реакторных сталей нового поколения, упрочняемых Y–Ti оксидами, заключающийся в том, что в качестве носителя кислорода при механическом легировании используются не трудно растворимые оксиды иттрия с высокой энергией межатомной связи, а малоустойчивые оксиды железа. На основе полученных научных представлений разработана оптимальная технологическая схема создания новых жаропрочных реакторных ODS-сталей за счёт деформационно-индуцированного введения кислорода из малоустойчивых оксидов железа в легированную иттрием и титаном нержавеющей сталь с целью последующего формирования термостойких иттрий-титановых нанооксидов в процессе отжига. Результаты открывают перспективы для создания слабо распухающих реакторных материалов с рекордными значениями жаропрочности и выгорания ядерного топлива.

Предложены также новые научные подходы к сдерживанию радиационного распухания: показана возможность резкого сни-

жения вакансионного порообразования в процессе облучения высокоэнергетическими частицами нержавеющей сталей при введении высокой плотности прямых и косвенных стоков точечных дефектов в виде межфазных аустенитно-мартенситных границ α/γ или границ, образующихся под облучением дисперсных интерметаллидов (γ' -Ni₃Ti и α' -Fe–Cr фаз в сталях с ГЦК и ОЦК решётками соответственно) [29]. Предложены составы стойких против нейтронного облучения 60 сна при рабочей температуре 500 °С сталей, которые распухают почти на порядок меньше, чем малотитанистые и беститановые стали. Совместно с ВНИИНМ им. А.А. Бочвара разработан вариант модернизации единственной работающей в реакторе аустенитной стали ЧС-68. В работах по радиационным материалам лаборатория механических свойств тесно контактирует также со специалистами из Института реакторных материалов и Белоярской АЭС (г. Заречный, Свердловской области). Сергей Степанович Лапин в 1993 г. защищает кандидатскую диссертацию на тему «Повышение стойкости нержавеющей сталей против радиационного распухания при облучении высокоэнергетическими частицами».

В изучении структурных и фазовых превращений в сталях и сплавах при экстремальных внешних воздействиях важнейшую роль сыграл мессбауэровский метод. Группа мессбауэровской спектроскопии в лаборатории механических свойств создаётся в середине 80-х во главе с к.ф.-м.н. В.А. Шабашовым, который, ещё работая в лаборатории кинетических явлений, сотрудничал с В.В. Сагарадзе по применению ядерного гамма-резонанса (ЯГР) для исследования структурных переходов в Fe–Ni сплавах. В 1985–1986 гг. в группу пришли выпускники физтеха УПИ Г.А. Волков и А.Г. Голиков. Г.А. Волков создал первый в лаборатории автоматизированный мессбауэровский спектрометр на базе многоканального анализатора. В это же время совместно с сотрудниками отдела высоких давлений Р.И. Кузнецовым, Д.И. Тупицей и В.П. Пилюгиным была реализована методика по наблюдению *in situ* мессбауэровских спектров при высоком давлении и сдвиге под давлением (СД) в наковальнях Бриджмена. Работы по наблюдению ЯГР при СД *in situ* были выполнены впервые в мире и по сей день не имеют аналогов. Пришедшие в группу новые сотрудники Н.П. Филиппова и Т.М. Лапина освоили современные методы компьютерного расчёта мессбауэровских спектров. В 1997 г. Татьяна Михайловна Лапина защищает диссертацию на степень к.ф.-м.н. «Радиационно-стимулированные структурные и фазовые превращения в никелевых аустенитных сталях при низкотемпературном облучении электронами». Первые работы по мессбауэровской спектроскопии на «горячих» (облучённых нейтронами) сплавах в Институте реакторных материалов (г. Заречный) связаны с именем Валерия Максимовича Колоскова, который в 1995 г. защищает диссертацию на тему «Мессбауэровское исследование



В.А. Шабашов

окисления границ зерен вольфрама и особенности зернограничной диффузии ^{57}Co ».

В конце 90-х – начале 2000-х годов группу пополнили новые молодые специалисты – А.Г. Мукосеев, к.т.н. А.В. Литвинов [31], А.Е. Заматовский, а позднее К.А. Козлов и К.А. Ляшков. В 2003 г. Александр Геннадьевич Мукосеев защищает кандидатскую диссертацию «Деформационно-индуцированное формирование твердых растворов внедрения и замещения в ОЦК и ГЦК сплавах на основе железа». В методическом плане (разработка и изготовление спектрометров) группа постоянно поддерживалась к.ф.-м.н. В.А. Семенкиным – сотрудником УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

В 2008 г. Валерием Александровичем Шабашовым была защищена докторская диссертация на тему «Локальная атомная структура в железосодержащих сплавах и соединениях при интенсивных деформационных и радиационных воздействиях». Впоследствии он становится лауреатом премии УрО РАН имени академика В.Д. Садовского (совместно с д.ф.-м.н. Е.П. Елсуковым) за цикл работ «Индукцированное мегапластической деформацией механическое сплавление в железосодержащих системах» и «Международной академической издательской компании «Наука/Интерпериодика» за лучшую публикацию в издаваемых ею журналах». В 2004–2009 г. группа В.А. Шабашова являлась организатором международных конференций ICMSA (International Conference Mossbauer Spectroscopy and its Applications).

Кирилл Александрович Козлов в 2009 г. защищает кандидатскую диссертацию на тему «Фазовые превращения в дисперсно-упрочняемых оксидами сталях и сплавах при интенсивной пластической деформации». В 2014 г. состоялась защита диссертации Кириллом Андреевичем Ляшковым на тему «Деформационно-индуцированные структурно-фазовые превращения в сплавах на основе железа с дисперсными нитридами». Выполнению этих исследований способствовало оснащение лаборатории шаровой мельницей, что позволило проводить работы по механосплавлению (механолегированию) и получению с использованием твердофазного механического синтеза упрочненных оксидами, а также высокоазотистых наноструктурированных сталей и сплавов [32].

Под руководством В.В. Сагарадзе выполняются работы по созданию сплавов с регулируемым в широких пределах коэффициентом термического расширения (КТР). Предложена модель магнитодисперсионного твердения инварных аустенитных сталей, позволяющая оценивать температурный коэффициент упрочнения сплавов при охлаждении ниже T_c с учётом возникающих упругих микроискажений вокруг малых областей магнитных неоднородно-

стей. Для Fe–Ni инваров рассматриваются возможности упрочнения и регулирования КТР. Показана уникальная возможность использования сталей с регулируемым КТР для создания псевдобиметаллических сенсоров с применением лазерной обработки (И.И. Косицына, В.А. Завалишин, С.В. Афанасьев).

С участием В.В. Сагарадзе, Е.В. Белозерова, Е.Г. Волковой, Н.Л. Печеркиной, В.А. Завалишина, Н.В. Катаевой, С.В. Афанасьева разработан новый класс высокопрочных дисперсионно-твердеющих аустенитных сталей с эффектом памяти формы [33]. Перевод аустенитных марганцевых сталей в разряд дисперсионно-твердеющих (в частности, с помощью легирования, обеспечивающего образование карбидов VC) позволяет получать высокие значения эффекта памяти формы (ЭПФ) при значительном повышении прочностных характеристик. При изменении количества, дисперсности и распределения карбидов VC в процессе старения удаётся регулировать в широких пределах характеристики прочности и ЭПФ. Формирование карбидов VC разной дисперсности может стабилизировать или дестабилизировать аустенит по отношению к образованию ϵ -мартенсита деформации, что позволяет регулировать как величину ЭПФ, так и степень упрочнения. В исследованных сталях получены значительные величины ЭПФ (2–2,5%) и высокие прочностные характеристики ($\sigma_{0,2} \sim 1000$ МПа). Из предложенных сталей изготовлен листовой прокат шириной 1000 мм. Стали предлагается использовать в качестве основного материала самораспрямляющихся цилиндрических герметизаторов коррозионно-механических повреждений обсадных труб нефтяных скважин и соединений трубопроводов.

Практически на все новые технологии и составы сталей в лаборатории получены патенты и авторские свидетельства на изобретения [16].

Активное участие в разработке высокопрочных аустенитных сталей со специальными свойствами, изучении внешних воздействий (нейтронное облучение, коррозионная среда, высокие температуры и напряжения) на структуру и свойства сплавов, исследовании структурно-фазовой стабильности функциональных сплавов на основе моноалюминидов никеля, изучении проявления эффекта памяти формы в железомарганцевых метастабильных сталях принимала И.И. Косицына. В 2004 г. Ирина Игоревна защищает докторскую диссертацию на тему «Закономерности формирования структуры и свойств высокопрочных аустенитных сталей разных систем легирования с карбидным упрочнением».

Продолжаются работы по повышению жаростойкости интерметаллидных сплавов. В 1988 г. Ольга Владимировна Антонова защищает кандидатскую диссертацию по жаропрочным сплавам ванадия. Указанное



И.И. Косицына



С.В. Косицын

направление получает дополнительный мощный импульс развития с приходом в лабораторию в 1993 г. из отраслевого института ЦНИИМ к.т.н. С.В. Косицына, который занимается разработкой материалов и технологий нанесения защитных и упрочняющих покрытий [34], в т.ч. жаростойких интерметаллидных композиций системы (Ni-Co-Fe) Cr-Al. С его активным участием проводятся также работы по изучению и созданию интерметаллидных сплавов с термоупругим мартенситным превращением.

В 1999 г. в группе С.В. Косицына защищается кандидатская диссертация Натальей Вадимовной Катаевой на тему «Стабильность жаростойких эвтектических сплавов Ni-Co-Cr-Al». А в 2002 г. уже сам Сергей Владимирович защищает диссертацию на степень доктора технических наук «Структурная и фазовая стабильность интерметаллидных сплавов и покрытий на основе β -фазы системы (Ni, Co, Fe)-Cr-Al». В работах С.В. Косицына с учениками и соавторами предложен новый принцип дополнительного повышения жаростойкости интерметаллидных сплавов, при окислении которых образуется защитная окисная плёнка Al_2O_3 , заключающийся в создании максимально дисперсной двухфазной ($\beta+\gamma$)-структуры (β – твёрдый раствор на основе интерметаллида NiAl, γ – твёрдый раствор на основе никеля) и её стабилизации в широком температурно-временном интервале. Одним из возможных путей реализации этого принципа предложен переход от обычных двухфазных ($\beta+\gamma$)-сплавов к эвтектическим, обладающим естественной дисперсностью и высокой термической стабильностью структуры. На основе полученной научной базы разработана технология газофазного алитирования для повышения жаростойкости металлических блоков-носителей нейтрализаторов отработанных газов автотранспорта. В 2008 г. была опубликована капитальная монография С.В. Косицына «Сплавы и покрытия на основе моноалюминида никеля» [35]. А в 2017 г. его бывший ученик Андрей Илдарович Валиуллин уже под руководством В.В. Сагарадзе защищает кандидатскую диссертацию «Фазовые превращения и эффект памяти формы в быстрозакристаллизованных мелкозернистых сплавах на основе системы Ni-Al».

Пятым заведующим лабораторией механических свойств и заведующим отделом материаловедения ИФМ УрО РАН в мае 2014 г. становится доктор технических наук Алексей Викторович Макаров. Выпускник УПИ, с 1983 г. работает в Академии наук, куда его пригласил член-корр. Киргизской АН В.Ф. Ухов заниматься в аспирантуре Института металлургии проблемой лазерного упрочнения сплавов. Однако после скоростной смерти Владилена Филипповича «научные университеты» с осени 1983 г.

А.В. Макаров фактически проходит у Льва Георгиевича Коршунова в лаборатории физического металловедения ИФМ, которую незадолго перед этим возглавил будущий академик Вадим Михайлович Счастливцев. А с 1986 г. А.В. Макаров – уже штатный научный сотрудник лаборатории физического металловедения. Там ему выпадает удача общения с академиком Виссарионом Дмитриевичем Садовским, который всегда проявлял живой интерес к вопросам воздействия лазерного излучения на металлы. Поэтому, как и В.В. Сагарадзе, А.В. Макарову по праву близки слова из Гимна металловедов ИФМ:

*Вместе мы пол жизни прошагали
Вдоль по коридорам ИФМ,
И с самим Садовским обсуждали
Запросто мы тысячи проблем...
Так будем этим дорожить
И дальше преданно служить
Металловедческой науке –
Науке, без которой нам не жить.*



А.В. Макаров

В период с 2000 по 2014 г. Алексей Викторович работает в Институте машиноведения УрО РАН заведующим лабораторией конструкционного материаловедения, не прерывая тесные научные и человеческие контакты с коллегами из ИФМ. Область его научных интересов – изучение структурных механизмов повышения износостойкости и упрочнения металлических сплавов за счёт создания метастабильных и нанокристаллических состояний, разработка на этой основе эффективных способов термических, деформационных и комбинированных обработок, применение неразрушающих электромагнитных методов для аттестации износостойких и высокопрочных структур, контроля износостойкости и механических свойств сталей и сплавов. Особый вклад внёс в создание основ наноструктурирующих фрикционных обработок и методов упрочнения и модифицирования поверхности лазерной закалкой и наплавкой. Разработки использованы в производстве бурового и штампового инструмента, в технологиях лазерного и фрикционного упрочнения быстроизнашивающихся изделий машиностроения. Профессор УрФУ (разработка и чтение курсов «Наноматериалы и нанотехнологии», «Лазерная обработка сталей и сплавов» и «Лазерные технологии модифицирования поверхности и прототипирования» в Институте новых материалов и технологий), председатель ГАК на кафедре термообработки и физики металлов УрФУ, член редколлегии журналов «Обработка металлов. Технология, оборудование, инструменты» (г. Новосибирск), «Diagnostics, Resource and Mechanics of materials

and structures» (г. Екатеринбург) и «Вектор науки ТГУ» (г. Тольятти). Награждён премией УрО РАН имени академика В.Д. Садовского за цикл работ «Высокопрочные износостойкие стали и сплавы с нанокристаллической структурой» (совместно с Л.Г. Коршуновым и Т.И. Табатчиковой, 2012 г.) и премией МАИК «Наука/Интерпериодика» за лучшие публикации (2001 г.). Автор более 250 статей, 6 монографий и учебных пособий, 11 изобретений.

В период с 2014 по 2017 г. вместе с А.В. Макаровым в лабораторию вливается целая группа молодых сотрудников: к.т.н. Н.В. Лежнин, аспиранты Г.В. Алисова (Самойлова) и С.В. Лучко, к.ф.-м.н. В.А. Сирош – ученик профессора В.Г. Гаврилюка из Института металлофизики имени Г.В. Курдюмова НАН Украины (г. Киев), инженеры М.С. Гибзун и М.А. Чалина.

В последние годы в рамках госбюджетной темы «Структура» лаборатория продолжает вести исследования по двум основным направлениям: 1) аномальные диффузионные структурно-фазовые превращения в условиях холодной мегапластической деформации и улучшение механических свойств сталей и сплавов: прочности, износостойкости, жаропрочности, радиационной стойкости; 2) наноструктурирование сталей и сплавов при циклических мартенситных превращениях и высокотемпературной деформации и получение высокопрочных металлических материалов с улучшенными функциональными свойствами.

В дополнение к уже сложившимся в лаборатории подходам решения этих проблем под руководством А.В. Макарова развивается оригинальное направление в области деформационного поверхностного наноструктурирования металлических материалов – финишная наноструктурирующая фрикционная обработка [36],



2017 г.: 1 ряд: Н.Л. Печеркина, А.В. Макаров, В.В. Сагарадзе, Т.Н. Кочеткова. 2 ряд: Н.К. Гилев, В.П. Кетова, В.А. Завалишин, А.В. Литвинов, Н.В. Катаева, И.Г. Кабанова, С.В. Афанасьев, Э.Н. Фризен

формирующая в условиях трения скольжения на поверхности практически любых сталей и сплавов градиентные наноструктурированные слои с повышенными механическими свойствами [37], улучшенными характеристиками теплостойкости [38] и износостойкости при одновременном обеспечении наношероховатости ($R_a < 100$ нм) поверхности (двойные нанотехнологии, не имеющие прямых аналогов в мире). Рассматриваются трибологические аспекты наноструктурирующих обработок деформирующим индентором [39], связанные с обоснованием их технологических условий для формирования высококачественной поверхности, а также с применением обработок для улучшения трибологических свойств сталей мартенситного и аустенитного классов, а также хромоникелевых лазерных покрытий. По данным микроиндентирования наноструктурирующие обработки увеличивают способность поверхностного слоя сплавов противостоять упруго-пластическому деформированию при контактом нагружении, ограничивая тем самым развитие неблагоприятных механизмов изнашивания. Указанные исследования проводятся в тесном сотрудничестве с лабораторией конструкционного материаловедения ИМАШ УрО РАН и ООО «Предприятие «Сенсор» (ген. директор д.т.н. В.П. Кузнецов, г. Курган), где промышленная технология наноструктурирующего выглаживания успешно реализуется в серийном производстве прецизионных деталей на многофункциональных обрабатывающих центрах [39].

Рассматривается также использование фрикционного воздействия при совершенствовании комбинированных и других перспективных технологий поверхностных наноструктурирующих обработок: деформационно-термические обработки аустенитных и мартенситных сталей, использование фрикционной обработки в комбинации с последующим плазменным азотированием с целью активизации низкотемпературного (350 °С) химического модифицирования металлических поверхностей, наноструктурирующая ультразвуковая ударно-фрикционная обработка как развитие известного метода ультразвуковой ударной обработки. Новое «ультразвуковое» направление технически обеспечено недавним приобретением в лабораторию ультразвуковой установки и компьютеризированного координатного стола.

Завершая исторический обзор развития научных направлений лаборатории механических свойств, важно назвать имена тех, кто в разные периоды **проработал в лаборатории более тридцати и даже пятидесяти (!) лет** (без упоминания званий и должностей, научных и иных трудовых достижений): Нина Ивановна Носкова (Чарикова) – 60 лет (1955–2015), Викторина Павловна Кетова – 59 лет (1957–2016), Виктор Алексеевич Павлов – 57 лет (1936–1993 с «перерывом на войну»), Юрий Иванович Филиппов – 57 лет (1959–2016), Тамара Николаевна Кочеткова – 56 лет (1961 – по наст. вр.), Ирина Алексеевна Перетурина – 55 лет



2017 г.: Н.В. Лежнин, Г.В. Самойлова, К.А. Козлов, В.А. Сирош, М.А. Чалина, С.В. Лучко, С.В. Афанасьев, К.А. Ляшков

(1954–2009), Нина Федоровна Вильданова – 53 года (1961–2014), Анатолий Иванович Дерягин – 52 года (1965 – по наст. вр.), Валентина Ивановна Сюткина – 51 год (1955–2006), Нина Леонидовна Печеркина 51 год (1966 – по наст. вр.), Эдуард Николаевич Фризен – 50 лет (1966 – 2016), Михаил Григорьевич Гайдуков – 48 лет (1952 – 2000), Николай Константинович Гилев – 45 лет (1972 – по наст. вр.), Эмилия Сергеевна Яковлева – 44 года (1932–1976), Виктор Исаевич Шалаев – 43 года (1957–2000), Наталия Дмитриевна Земцова и Владимир Александрович Завалишин – по 36 лет (1981 – по наст. вр.), Виктор Владимирович Сагарадзе – 35 лет (1982 – по наст. вр.), Ирина Геннадьевна Кабанова и Валерий Александрович Шабашов – по 31 году (1986 – по наст. вр.).

Эти преданные лаборатории сотрудники – её главное достоинство и пример молодым, которым творить дальнейшую историю, преумножая традиции и научные достижения лаборатории механических свойств на благо Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН и всей Российской Науки! И символично, что на последней коллективной фотографии представлены почти все (за исключением к.т.н. А.В. Пушина, аспирантки М.Ф. Ключиной и инженера М.С. Гибзуна) молодые сотрудники лаборатории механических свойств, продолжающей свое поступательное развитие.

Авторы благодарят за помощь в подготовке материалов для написания главы сотрудников лаборатории д.ф.-м.н. В.А. Шабашова, к.ф.-м.н. В.А. Завалишина, к.т.н. Литвинова, к.ф.-м.н. Е.Г. Волкову, к.ф.-м.н. К.А. Козлова, Н.Л. Печеркину и Т.Н. Кочеткову.

А.В. Макаров, В.В. Сагарадзе

Список литературы

1. Физика металлов на Урале. История Института физики металлов в лицах, РИО УрО РАН, Екатеринбург (2012) 496 с.
2. М.В. Якутович, Э.С. Яковлева, ЖТФ **5**, 1172 (1935).
3. М.В. Якутович, Э.С. Яковлева, ЖЭТФ **9**, 884 (1939).
4. Э.С. Яковлева, М.В. Якутович, ЖТФ **5**, 1744 (1935).
5. Э.С. Яковлева, Металлург, № 11, 68 (1935).
6. Э.С. Яковлева, ЖЭТФ **3**, 454 (1933); Sow. Phys. **3**, 429 (1933).
7. Э.С. Яковлева, ЖТФ **9**, 1280 (1939).
8. В.С. Аверкиев, Г.Н. Колесников, В.А. Павлов, М.В. Якутович, ЖТФ **16**, 1349 (1946).
9. Э.С. Яковлева, М.В. Якутович, Зав. лаб. **13**, 1263 (1947).
10. Г.Н. Колесников, Ф.П. Рыбалко, М.В. Якутович, Зав. лаб. **13**, 1267 (1947).
11. М.Н. Михеев, Труды ИФМ УФАН **12**, 3 (1949).
12. В.А. Павлов, Физические основы пластической деформации металлов, Наука, Москва (1962), 199 с.
13. В.А. Павлов, ФММ **59**, 629 (1985).
14. В.А. Павлов, Физические основы холодной деформации ОЦК металлов, Наука, Москва (1978), 208 с.
15. К.А. Малышев, В.В. Сагарадзе, И.П. Сорокин, А.И. Уваров, В.А. Теплов, Н.Д. Земцова, Фазовый наклеп аустенитных сплавов на Fe-Ni основе, Наука, Москва (1982), 260 с.
16. В.В. Сагарадзе, А.И. Уваров, Упрочнение и свойства аустенитных сталей. РИО УрО РАН, Екатеринбург (2013), 720 с.
17. Б.А. Гринберг, В.И. Сюткина, Новые методы упрочнения упорядоченных сплавов, Металлургия, Москва (1985), 174 с.
18. V.V. Sagaradze, V.E. Danilchenko, P.L'Heritier, V.A. Shabashov, Mat. Sci. Eng. **A337**, 146 (2002).
19. Н.И. Носкова, Дефекты и деформация монокристаллов, РИО УрО РАН, Екатеринбург (1995), 184 с.
20. Н.И. Носкова, Р.Р. Мулюков, Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы, РИО УрО РАН, Екатеринбург (2003), 280 с.
21. В.В. Сагарадзе, А.И. Уваров, Упрочнение аустенитных сталей, Наука, Москва (1989), 270 с.
22. Г.Н. Карпов, М.М. Малыш, Г.А. Марьин, А.М. Рудаков, В.В. Сагарадзе, А.И. Уваров, Физико-механические свойства высоконикелевых сталей и сплавов, Изд-во ЦНИИ информации, Москва (1990), 112 с.
23. И.И. Косицына, В.В. Сагарадзе, Высокопрочные аустенитные стали с карбидным упрочнением, РИО УрО РАН, Екатеринбург (2010), 178 с.
24. В.В. Сагарадзе, Ю.И. Филиппов, А.Ф. Матвиенко, Б.И. Мирошниченко, В.Е. Лоскутов, В.А. Канайкин, Коррозионное растрескивание аустенитных и ферритоперлитных сталей, РИО УрО РАН, Екатеринбург (2004), 228 с.
25. Yu.N. Zuev, V.V. Sagaradze, N.L. Pecherkina, I.I. Kabanova, I.L. Svyatov, S.V. Bondarchuk, D.V. Belyaev, Phys. Met. Met. **114**, No. 13 (suppl.), 1097 (2013).
26. В.А. Завалишин, А.И. Дерягин, В.В. Сагарадзе, ФММ **75**, 90 (1993).
27. В.В. Сагарадзе, В.А. Шабашов, ФММ **112**, 155 (2011).
28. V.V. Sagaradze, V.A. Shabashov, N.V. Kataeva, V.A. Zavalishin, K.A. Kozlov, A.R. Kuznetsov, A.V. Litvinov, V.P. Pilyugin, Phil. Mag. **96**, 1724 (2016).

29. В.В. Сагарадзе, С.С. Лапин, ФММ **83**, № 4, 129 (1997).
30. V.V. Sagaradze, S.S. Lapin, B.N. Goshchitskii, M.A. Kirk, J. Nucl. Mater. **258–263**, 1675 (1998).
31. В.С. Литвинов, А.В. Литвинов, *Мёссбауэровская спектроскопия в металлофизике*, Изд-во УГТУ-УПИ, Екатеринбург (2007), 130 с.
32. В.А. Шабашов, К.А. Козлов, К.А. Ляшков, Н.В. Катаева, А.В. Литвинов, В.В. Сагарадзе, А.Е. Заматовский, ФММ **115**, 419 (2014).
33. В.В. Сагарадзе, С.В. Афанасьев, Е.Г. Волкова, В.А. Завалишин, ФММ **117**, 180 (2016).
34. Б.Н. Гузанов, С.В. Косицын, Н.Б. Пугачева, *Упрочняющие защитные покрытия в машиностроении*, РИО УрО РАН, Екатеринбург (2004), 244 с.
35. С.В. Косицын, *Сплавы и покрытия на основе моноалюмида никеля*, РИО УрО РАН, Екатеринбург (2008), 380 с.
36. А.В. Макаров, в кн. *Конструкционные и функциональные материалы на металлической основе*, Изд-во Урал. гос. ун-та, Екатеринбург (2014), С. 109.
37. A.V. Makarov, R.A. Savrai, E.S. Gorkunov, A.S. Yurovskikh, I.Yu. Malygina, N.A. Davydova, Phys. Mesomech. **18**, 43 (2015).
38. А.В. Макаров, Л.Г. Коршунов, Р.А. Саврай, Н.А. Давыдова, И.Ю. Малигина, Н.Л. Черненко, ФММ **115**, 324 (2014).
39. V.P. Kuznetsov, A.V. Makarov, S.G. Psakhie, R.A. Savrai, I.Yu. Malygina, N.A. Davydova, Phys. Mesomech. **17**, 250 (2014).

ЛАБОРАТОРИЯ

физического металловедения

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Табатчикова Татьяна Иннокентьевна, заведующий лабораторией, д.т.н.
- Абдуллина Дарья Николаевна, инженер-исследователь
- Ануфриева Елена Ильинична, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Виноградова Нина Ивановна, старший научный сотрудник
- Грешнова Екатерина Дмитриевна, младший научный сотрудник
- Грищенко Лидия Герасимовна, термист 6 разряд
- Дельгадо Рейна Светлана Юрьевна, младший научный сотрудник, к.т.н.
- Егорова Лада Юрьевна, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Завьялов Владимир Михайлович, главный специалист
- Зельдович Виталий Ильич, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор
- Калетина Юлия Владимировна, главный научный сотрудник, д.т.н.
- Коптелова Елена Викторовна, старший лаборант
- Коршунов Лев Георгиевич, главный научный сотрудник, д.т.н.
- Русаков Герман Михайлович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Суаридзе Теона Романиевна, младший научный сотрудник
- Счастливцев Вадим Михайлович, главный научный сотрудник, д.т.н., академик РАН, профессор
- Терещенко Наталья Адольфовна, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Уваров Александр Иванович, главный специалист-советник, д.т.н.
- Фролова Наталья Юрьевна, старший научный сотрудник
- Хейфец Алексей Эдуардович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Хлебникова Юлия Валентиновна, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Хомская Ирина Вячеславовна, ведущий научный сотрудник, д.т.н.
- Черненко Наталья Леонидовна, старший научный сотрудник
- Яковлева Ирина Леонидовна, главный научный сотрудник, д.т.н.

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ физического металловедения

Лаборатория физического металловедения была создана в 1932 г. Она была одной из двух первых академических лабораторий на Урале и в то время носила название «Лаборатория металловедения» [1]. Её организатором был Сергей Самойлович Штейнберг (1872–1940 гг.). В 1939 г. Уральский научно-исследовательский физико-технический институт, созданный также в 1932 г., был передан из Наркомчермета в Уральский филиал Академии наук СССР – УФАН СССР. В этом же 1939 г. он был объединён с лабораторией металловедения и стал именоваться Институт металлургии, металловедения и металлофизики УФАН СССР. Директором этого Института стал С.С. Штейнберг, который 28 января 1939 г. был избран в члены-корреспонденты Академии наук СССР по Отделению технических наук (металлургия). Но вскоре, 7 сентября 1940 г., он скончался. Заведующим лабораторией металловедения 13 сентября 1940 г. был назначен Виссарион Дмитриевич Садовский (1908–1991 гг.) Начав трудовую деятельность в Златоусте на Златоустовском инструментальном заводе имени В.И. Ленина, в 1935 г. он по приглашению С.С. Штейнберга приехал в Свердловск и стал сотрудником лаборатории металловедения. Позднее эта лаборатория стала именоваться лабораторией физического метал-



Организатор и первый заведующий лабораторией металловедения член-корреспондент АН СССР С.С. Штейнберг (1872–1940 гг.)



Заведующий лабораторией физического металловедения академик РАН В.Д. Садовский (1940–1982 гг.)

ловедения. В.Д. Садовский руководил лабораторией до 1982 г., а позже, до февраля 1991 г. являлся руководителем отдела материаловедения. Под его руководством были решены важнейшие проблемы физического металловедения, среди них: построены диаграммы превращений переохлаждённого аустенита для сталей [2]; выполнены работы по мартенситному и бейнитному превращению в сталях [3–6]; предложен и обоснован метод высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО), которая повышает прочность сталей и предотвращает хрупкое разрушение [7–9]; совместно с К.А. Малышевым и Б.Г. Сазоновым открыто явление структурной наследственности в стали при нагреве [10–14]; решена проблема влияния магнитного поля на мартенситное превращение в стали [15–19].

Ещё на Златоустовском заводе В.Д. Садовский начал заниматься **исследованием кинетики распада переохлаждённого аустенита** и связи получаемой структуры с механическими свойствами. Позже были изучены влияние основных легирующих элементов на положение мартенситной точки в сталях, количество остаточного аустенита и скорость его распада при последующем отпуске. В 1939 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Остаточный аустенит и его влияние на свойства стали». Научные результаты довоенного периода были изложены в монографии В.Д. Садовского «Структурные превращения при закалке и отпуске конструкционных сталей» (1944 г.).

Во время войны В.Д. Садовский, выполняя военные заказы, не прерывал научные исследования, так как изучаемые им, в основном, хромоникелевые стали применялись в промышленности для изготовления артиллерийских орудий и снарядов к ним. Результаты проводимой работы имели не только практическое, но и научное значение. В 1945 г., ещё до Победы, 27 апреля В.Д. Садовский защитил докторскую диссертацию на тему «Превращения переохлаждённого аустенита и термическая обработка легированных конструкционных сталей», в которую вошли многие результаты, полученные при выполнении оборонных заказов. В этом же году вышла монография «Влияние легирующих элементов на ударную вязкость конструкционных сталей и явления хрупкости при отпуске» [20], послужившая отправной точкой для последующих исследований природы отпускной хрупкости. Обобщением исследований распада аустенита при охлаждении стал атлас диаграмм «Превращения переохлаждённого аустенита» [2], одна из первых в мире работ такого рода. Основные достижения в изучении проблемы переохлаждённого аустенита: данные о влиянии углерода и легирующих элементов на положение мартенситной точки; явление стабилизации остаточного аустенита в зависимости от скоро-

сти охлаждения при закалке, от времени вылеживания после закалки до отпуска, а также от температуры отпуска.

Научным сотрудником лаборатории с 1934 г. был и Константин Александрович Малышев (1901–1988 гг.), который рассматривал процессы роста аустенитного зерна при высоких температурах и влияние на этот процесс малых добавок в составе стали таких элементов, как ванадий, алюминий и титан. В это время металловеды обратили внимание на то обстоятельство, что механические свойства сталей при комнатной температуре существенно зависят от величины аустенитных зёрен, существовавших при высоких температурах. Металлурги начали делить стали на наследственно крупнозернистые и на наследственно мелкозернистые. К.А. Малышев показал, что такое деление неверное, просто в некоторых сталях укрупнение зерна происходило при более низких температурах, чем в других сталях близкого состава.

В этот же период возникла **проблема отпускной хрупкости стали**, когда при исследовании влияния отпуска на механические свойства сталей было обнаружено, что по мере повышения температуры отпуска закалённой стали наблюдается монотонное падение прочности, а изменение ударной вязкости, напротив, может происходить немонотонно, с максимумами и глубокими минимумами. Такие непредсказуемые изменения свойств чаще всего происходили на дорогих и наиболее прочных легированных сталях, которые применялись для самых ответственных деталей. Данное явление получило название отпускной хрупкости, которая проявляется в двух температурных интервалах 300–450 °С (необратимая отпускная хрупкость) и 500–550 °С (обратимая отпускная хрупкость).

Сотрудником лаборатории Е.Н. Сокольниковым было установлено, что необратимая отпускная хрупкость связана с процессом карбидообразования при распаде мартенсита [21]. Труднее обстояло с изучением обратимой отпускной хрупкости, поскольку тогда отсутствовала необходимая экспериментальная база определения малых примесей, локализованных на границах зёрен. Позже такие работы были проведены, полученные результаты совпали с данными зарубежных исследователей.

Ещё в довоенный период наиболее остро встала **проблема камневидного излома**, поскольку на практике для увеличения производительности кузнечно-прессового оборудования деформируемый металл часто подвергали перегреву, при котором зерно достигало значительных размеров. Исправление структуры перегретой стали при проведении термообработки не всегда приводило к ожидаемому результату, величина зёрен после повторного нагрева



Один из основоположников лаборатории профессор К.А. Малышев



Камневидный излом стали 38НМФА-Ш (А.Б. Кутьин)

оставалась недопустимо большой и возникал очень грубый, так называемый «камневидный» излом. Его появление связывали с наличием выделений сульфидов по границам зёрен. К.А. Малышев показал, что на образование камневидного излома влияет не столько химический состав сталей, сколько их «металлургическая природа», то есть наличие в сталях тех или иных примесей. Небольшие добавки в сталь ванадия, алюминия или титана препятствуют росту зерна при нагреве, так как они образуют мелкие включения, тормозящие рост зёрен.

В том случае, когда повторный нагрев сталей, имеющих выделение крупных сульфидов по границам зёрен, проводили до более низких температур, чем температуры перегрева, сульфиды не растворялись полностью и оставались на месте границ старых зёрен аустенита. После охлаждения в таких сталях по-прежнему наблюдался грубый крупнозернистый излом, несмотря на то, что металлографически в структуре обнаруживалось мелкое зерно, поэтому такой излом получил название «вторичного» камневидного излома.

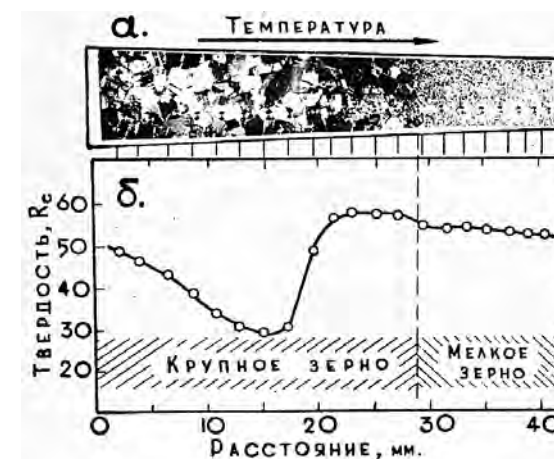
Позже, в 80-х гг., под руководством В.Д. Садовского, уже с использованием современных методик, это направление было продолжено А.Б. Кутьиным, Н.М. Гербих и А.М. Поляковой на сталях электрошлакового переплава. В результате удалось не только достоверно связать факт появления камневидного излома с полным растворением и последующим выделением сульфидов, но и проанализировать изменение формы сульфидов и мест их зарождения в зависимости от режимов охлаждения [22, 23].

Скоростная электротермическая обработка являлась важным направлением исследований во время войны. Главное преимущество электронного нагрева состояло в том, что быстрый нагрев до высоких температур обеспечивает возможность сохранения мелкого зерна аустенита и отпадает необходимость в длительной выдержке для прогрева изделий, что благотворно влияет на механические свойства. В работах, проведённых в лаборатории, было показано, что при скоростях нагрева 200–400 град/с какого-либо существенного повышения критической точки A_{c1} не происходит. Позднее В.Д. Садовский вместе с исследователями из Киева, Минска и Москвы был удостоен Государственной премии СССР в области техники за 1986 г.: «За создание научных основ, разработку и промышленное внедрение технологических процессов скоростного термического упрочнения сталей и сплавов».

После войны было исследовано влияние скорости нагрева на рост зерна. Эти опыты привели не только к важным результатам по установлению кинетики роста зёрен, но позволили подойти к проблеме «нафталинистого» излома в сталях, решение которой привело к появлению нового направления в изучении фазовой перекристаллизации сталей, которое позднее получило название структурной наследственности в сталях при нагреве. Но начало этой проблемы было положено работами по изучению кинетики роста зёрен как при увеличении температуры нагрева, влияния на это процесса предварительной деформации и термообработки, так и изменения состава сталей.

Основываясь на результатах, полученных при изучении перекристаллизации при повторной закалке быстрорежущей стали, К.А. Малышев сделал очень важное и смелое утверждение. Он предположил, что фазовое превращение, также как и деформация, сопровождается появлением дефектов кристаллической решётки в стали и её упрочнением. Он обозначил это явление как фазовый наклёп. Тогда измельчение зерна при повторных нагревах быстрорежущей стали легко объяснялось протеканием в ней рекристаллизации аустенита, обусловленной фазовым (внутренним) наклёпом. Вышедшая в 1950 г. статья В.Д. Садовского, К.А. Малышева и Н.В. Вьяль о перекристаллизации быстрорежущей стали при последующих нагревах, по-существу, положила начало развитию очень важного нового направления в металловедении.

В статье К.А. Малышева, В.Д. Садовского и Б.Г. Сазонова, вышедшей в 1950 г., утверждалось, что: «Процесс перекристаллизации при нагреве стали представляет собой сложное явление, включающее фазовое превращение, рекристаллизацию и рост зерна». Понятие о рекристаллизации аустенита при нагреве из-за внутреннего (фазового) наклёпа было впервые введено в статье В.Д. Садовского, К.А. Малышева и Б.Г. Сазонова [24], а позже в монографии этих же авторов «Фазовые и структурные превращения при нагреве стали» было предложено и обосновано новое представление о перекристаллизации сталей при нагреве, состоящей из двух стадий: собственно фазового превращения, приводящего к образованию наклёпанного и ориентационно связанного с исходной структурой аустенита, и рекристаллизации аустенита, приводящей к измельчению зерна аустенита, снятию фазового наклёпа и устранению внутризёрной текстуры.



Изменение микроструктуры (а) и твёрдости (б) по длине образца стали 35ХГС, предварительно закалённой от 1300 °С, после градиентного нагрева со скоростью 200 град/с и последующей закалки [24]

В это же время (начало 50-х годов) К.А. Малышев пришел к выводу, что **фазовый наклёп**, являющийся причиной рекристаллизации аустенита при нагреве, может быть использован **для упрочнения аустенитных сплавов**. В результате фазового наклёпа, возникающего в процессе прямого и обратного мартенситного превращения, аустенит упрочнялся. Далее была продолжена разработка нового метода фазового наклёпа аустенитных сталей, не требовавшего применения обработки холодом. В связи с этим были разработаны стареющие сплавы, в которых сочетание прямого и обратного мартенситных превращений с процессами старения, позволяло добиваться значительного роста прочности, не прибегая к обработке холодом.

В результате под руководством К.А. Малышева были разработаны и внедрены новые марки немагнитных сталей, не уступающие по свойствам современным конструкционным сталям высокой прочности. Многие из них нашли применение в промышленности, в частности, для упрочнения бандажных колец мощных турбогенераторов на Уралмашзаводе. Это направление получило плодотворное развитие в работах В.В. Сагарадзе и А.И. Уварова. Исследования по упрочнению аустенита циклическими превращениями γ - α - γ вошли в монографию «Фазовый наклёп аустенитных сплавов на Fe-Ni основе», за которую в 1984 г. К.А. Малышев, В.В. Сагарадзе и А.И. Уваров получили Премию АН СССР имени П.П. Аносова.

Высокотемпературная термомеханическая обработка – ВТМО была предложена в Институте физики металлов АН СССР в 1954 г. Её авторы В.Д. Садовский, Л.В. Смирнов и Е.Н. Соколов, изучая влияние рекристаллизации аустенита после внешнего и фазового наклёпа на обратимую и необратимую отпускную хрупкость стали, обнаружили интересную закономерность. Если горячедеформированный аустенит не претерпевал перед закалкой рекристаллизации, то развитие обратимой отпускной хрупкости ослаблялось, что выражалось как в значительном росте ударной вязкости, так и в замене хрупкого интеркристаллитного излома вязким транскристаллитным. Это новое явление стало одним из главных научных направлений лаборатории на несколько последующих лет.

В диссертациях Л.В. Смирнова и Е.Н. Соколкова и позднее в статьях [24–26] сформулированы основные особенности и сущность метода ВТМО – исключение процессов рекристаллизации аустенита после пластической деформации. Отсутствие рекристаллизации контролировалось по более высокой твёрдости стали и металлографически – по наличию зубчатости на границах аустенитных зёрен. В работах С.Н. Петровой было показано, что термомеханическая обработка приводит к повышению жаропрочности аустенитных сплавов, не претерпевающих при закалке мартенситного превращения. Исследования в данном на-

правлении продолжились под руководством талантливого учёного Е.Н. Соколкова, защитившего докторскую диссертацию по проблемам ВТМО в 1965 г. Позднее началось бурное развитие металловедения в области ТМО сталей и сплавов в нашей стране (в частности, в лаборатории, возглавляемой М.Л. Бернштейном в МИСиС) и за рубежом. Позднее, в 1989 г. С.Н. Петровой и Л.В. Смирнову была присуждена Государственная премия СССР за работу «Создание научных основ и технологий термомеханического упрочнения сталей и сплавов».

Работа над изучением превращений в сталях при нагреве продолжалась и после написания монографии [12]. **Исследование структурной наследственности и рекристаллизации аустенита, обусловленной фазовым наклёпом**, стало одним из основных научных направлений лаборатории в 60–80-х годах XX в. Главным вопросом было определение влияния скорости нагрева на структурные особенности образования аустенита. Потребовали дополнительного изучения и кристаллографические параметры текстурованного комплекса мелких зёрен, образующегося в результате фазового превращения при нагреве, что можно было выполнить, только привлекая для этой цели методы рентгеноструктурного анализа.

В 1956 г. Г.Н. Богачевой и В.Д. Садовским [27] было показано, во-первых, что, структурная наследственность при нагреве



Лаборатория физического металловедения в 1962 г.

наблюдается не только в сплавах на железной основе – сталях, но, по-видимому, и в сплавах цветных металлов, испытывающих полиморфные превращения. Во-вторых, структурная наследственность может проявляться не только в сплавах, испытывавших мартенситное или бейнитное превращения, но также в сплавах, претерпевших эвтектоидный, перлитный распад. В-третьих, в этой работе, пожалуй, впервые было чётко сказано, что при повторном нагреве в сплаве может возникать на месте исходного зерна не комплекс мелких текстурованных зёрен – внутризёрненная текстура, а воспроизводиться одно зерно такой же величины, формы и кристаллографической ориентации, что и первоначальное зерно, то есть происходить восстановление зерна.

В 1959 г. Б.К. Соколов и В.Г. Горбач написали статью: «Бездиффузионное образование аустенита при нагреве закалённой стали». В ней они впервые металлографическим методом показали, что при повторном нагреве в закалённой стали, а не в сплаве цветных металлов, наблюдается восстановление зерна. Позже в статье, написанной В.Д. Садовским совместно с Б.К. Соколовым, были приведены убедительные данные, которые можно было рассматривать как металлографическое доказательство воспроизведения величины и формы зерна аустенита, а не образование внутризёрненной текстуры в объёме первоначального зерна аустенита [13]. Однако для решения возникших вопросов требовалось привлечение рентгенографического и электронно-микроскопического методов исследования и переход на исследования монокристаллов.

Одна из первых проблем, которая была успешно решена В.М. Счастливцевым – определение механизмов образования аустенита при нагреве, что, в конечном итоге, предопределяет причины структурной наследственности. Задача была исключительно сложной, поскольку для её решения необходимо было выяснить, каков принцип формирования пакета мартенсита, каковы кристаллографические связи между исходным мартенситом и образующимся из него при нагреве аустенитом и установить, в конечном итоге, в чём заключается причина структурной наследственности.

Первое достоверное рентгенографическое доказательство совпадения кристаллографической ориентации исходного и вновь образовавшихся зёрен аустенита приведено в работе Г.Н. Богачевой и В.М. Счастливцева [28], выполненной на стали, содержащей 1,1 % С и 8,0 % Mn, в которой можно при быстром охлаждении от высоких температур до комнатной зафиксировать аустенитное состояние. Методом Лауэ было установлено, что при определённых режимах нагрева происходило воспроизведение ориентировки вновь образуе-



Заведующий лабораторией физического металловедения, академик РАН В.М. Счастливцев (1982–2008 г.г.)



Восстановление макроструктуры (а, б) и кристаллографической ориентировки (в) закалённого бикристалла стали 37ХН3Т (В.М. Счастливцев): а – исходное состояние, х 4; б – после повторного медленного нагрева до 950 °С с последующей закалкой, х 4; в – кристаллографическая ориентировка аустенита (1 – исходное состояние, 2 – после повторного нагрева до 950 °С и последующей закалки)

гося аустенитного зерна, а при повышении температуры нагрева ориентация зерна изменялась в результате рекристаллизации.

Появление стальных монокристаллов позволило расширить тематику исследований и использовать монокристаллы не только для определения восстановленных зерен аустенита, но и для нахождения ориентировок рекристаллизованных зёрен, образовавшихся на месте восстановленных зёрен аустенита [29]. Была установлена ориентационная связь между исходными и рекристаллизованными зёрнами аустенита при рекристаллизации, обусловленной фазовым наклёпом [30]. Опыты показали, что наблюдается восстановление величины, формы и ориентации первоначального зерна аустенита как при медленном [31], так и при быстром нагревах [32].

Позднее многие результаты исследований, проведённых на монокристаллах, были обобщены в монографии [33]. Рентгеноструктурные данные позволили доказать, что существует текстурованный комплекс мелких зёрен, так называемая вторичная внутризёрненная текстура, которая образуется при нагреве закалённых сталей с промежуточными скоростями. После серии этих работ начали чётко различать явление восстановления зерна аустенита при нагреве и появление мелкозернистого текстурованного комплекса, который мог характеризоваться крупнозернистым изломом.

Для железоникелевых сплавов проявление или отсутствие структурной наследственности было сопоставлено с определёнными механизмами образования аустенита. В работах В.И. Зельдовича, И.В. Хомской, О.С. Ринкевич [34] развиты представления об изменении механизма образования аустенита в железоникелевых сплавах с ферритной и мартенситной структурами в широком диапазоне скоростей нагрева и в условиях высоких статических и динамических давлений.

Широкое применение рентгеноструктурного анализа и улучшение методов выявления металлографической структуры в сталях позволило получить результаты, которые обобщены в монографии В.Д. Садовского «Структурная наследственность в сталях», опубликованной в 1973 г. [14]. Президиум АН СССР за эту монографию присудил В.Д. Садовскому Золотую медаль имени Д.К. Чернова, а в 1978 г. Садовскому удостоен звания Героя Социалистического Труда за заслуги в развитии советской науки. Тут необходимо отметить, что В.Д. Садовский является одним из основателей Уральской школы металловедов. Так, только в лаборатории физического металловедения им и К.А. Малышевым и их учениками было подготовлено почти восемь десятков кандидатов наук и более двадцати докторов наук [1]. В.М. Счастливцев избран действительным членом РАН в 2003 г., а членами-корреспондентами РАН – Е.П. Романов (1997 г.) и В.В. Сагарадзе (2011 г.) Происходила и смена руководства лаборатории. С 1982 по 2008 гг. ей руководил В.М. Счастливцев, а с 2008 г. – Т.И. Табатчикова.

Структурная наследственность была одним из основных научных направлений академика АН СССР В.Д. Садовского (избран в члены Академии наук СССР в 1970 г.), к концу XX в. удалось в основном решить эту проблему, благодаря работам, осуществлённым в лаборатории. Однако и в настоящее время продолжается исследование структурной наследственности в ряде металлов, испытывающих фазовые полиморфные превращения, происходящие в твёрдом состоянии кристаллографически упорядоченным механизмом перестройки решётки высокотемпературной фазы в низкотемпературную, приводящие к формированию вполне закономерных группировок кристаллов – ансамблей или пакетов образующейся фазы в объёме исходного зерна. В работах Ю.В. Хлебниковой и Д.П. Родионова и др. [35, 36] подтверждён факт структурной наследственности в псевдомонокристаллах циркония и титана после цикла $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma$ -превращений.

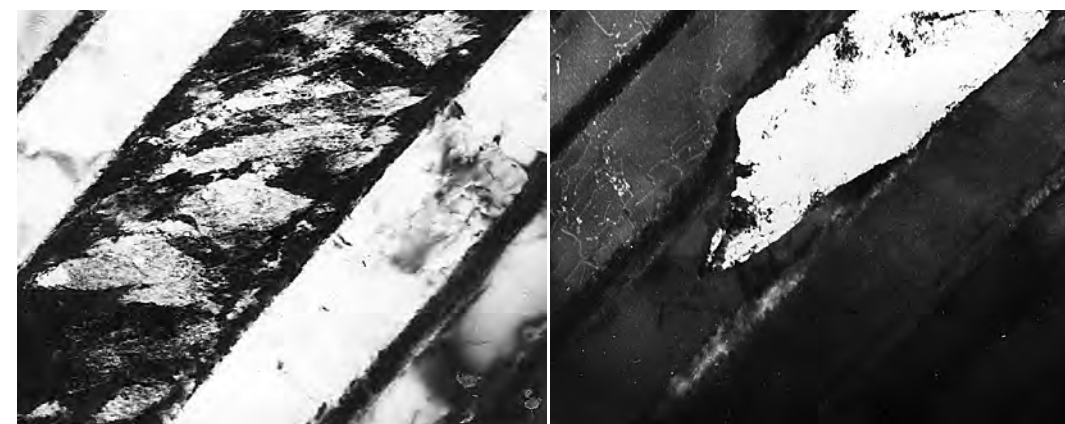
Развитие теории мартенситного превращения и исследование механизма образования аустенита при нагреве произошло благодаря освоению методики получения крупных стальных монокристаллов. В лаборатории было выполнено несколько важных работ по определению кристаллографических особенностей реечного мартенсита – основной структурной составляющей закалённых конструкционных, в том числе высокопрочных сталей. Определена структура пакета мартенситных кристаллов и установлены физические принципы его образования, электронно-микроскопическим методом впервые обнаружены места залегания остаточного аустенита в структуре реечного мартенсита [31].

После появления результатов, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии [37, 38], удалось осуществить прорыв в вопросе о механизме восстановления исходного зерна аустенита при нагреве. Позже в 1976 г. в статье [39] было

впервые показано, что «при всех скоростях нагрева зародыши аустенита ...возникают между двумя мартенситными кристаллами, имеют пластинчатую форму, ориентационно связаны с мартенситом... В этом случае при завершении аустенитизации наблюдается восстановление зерна, перекристаллизации стали не происходит. В верхней части межкритического интервала температур в условиях ...ускоренного нагрева могут возникать почти равноосные зерна аустенита..., образование которых связано с протеканием рекристаллизационных процессов в условиях незавершённого фазового превращения...».

В сталях с исходной перлитной структурой, содержащей избыточную фазу в виде цементита или феррита, В.М. Счастливцевым и И.Л. Яковлевой также было обнаружено проявление структурной наследственности и последующей рекристаллизации аустенита [40]. Полученные результаты и их трактовка вошли как раздел 4.2. «Превращения при нагреве стали. Структурная наследственность» в трёхтомный справочник «Металловедение и термическая обработка стали и чугуна», широко используемый материаловедами [41].

Лазерный нагрев и перекристаллизация стали. Развитие представлений о двухстадийном механизме перекристаллизации при нагреве произошло в 80-х годах XX века, когда появилась возможность использовать лазерное излучение для нагрева стальных образцов вплоть до плавления. Одной из отличительных черт лазерного нагрева было подавление диффузионных процессов перераспределения атомов углерода в аустените в связи с кратковременностью пребывания металла при высоких температурах [42]. Оказалось, что предварительный отпуск закалённой стали, предварительная пластическая деформация, не изменяя механизма образования аустенита (зародыши образуются по ме-



Бездиффузионное образование аустенита внутри перлитной колонии стали У8 при быстром нагреве:
а – светлопольное изображение, б – темнопольное изображение в рефлексе $\{110\}$ α -фазы

ханизму «восстановления» – на границах соседних кристаллов мартенсита), влияют на положение температуры рекристаллизации, обусловленной фазовым наклепом.

В 1990 г. монография «Лазерный нагрев и структура стали» удостоена премии имени Д.К. Чернова НПО «Машпром». Данное направление в последствии было развито В.М. Счастливым, И.Л. Яковлевой и Т.И. Табатчиковой в работах [43, 44], в которых впервые в мире описано экспериментально обнаруженное бездиффузионное образование аустенита в сталях с перлитной структурой при сверхскоростном лазерном нагреве. В колониях перлита на месте практически безуглеродистого феррита образовывался аустенит с очень малым содержанием углерода. При последующем очень быстром охлаждении эти аустенитные участки превращались в феррит. Даже весьма небольшая выдержка образца при высокой температуре приводила к науглероживанию аустенита, вследствие этого при охлаждении на месте этих пластин возникала мартенситная структура.

Изучение влияния магнитного поля на мартенситное превращение было начато В.Д. Садовским ещё в 1961 г. Полученные результаты обобщены в монографии [18], в которой показано, что магнитное поле является фактором внешнего воздействия, который приводит к смещению точки фазового равновесия T_0 в сторону образования мартенситной фазы с более высокой намагниченностью и расширяет область её существования. В.М. Счастливым, Ю.В. Калетиной и Е.А. Фокиной были успешно продолжены исследования в данном направлении [45]. Они установили, что под действием магнитного поля могут образовываться кристаллы мартенсита любого морфологического типа, а не только линзовидные кристаллы, как предполагалось ранее [18].

Иницирующее действие магнитного поля позволило наблюдать и затем изучить стадии формирования линзовидного кристалла мартенсита. В.Д. Садовский и Л.Н. Ромашев [46] впервые в мире наблюдали две стадии роста мартенситных кристаллов: практически мгновенное зарождение тонкого мидриба и медленное его обрастание, приводящее к появлению линзовидного кристалла мартенсита [47, 48]. Оказалось, что в отличие от термоупругого мартенсита, образующегося в сплавах цветных металлов, в исследованных сталях мартенситная пластина растёт в ширину. Рост сопровождается релаксацией упругих напряжений, что приводит к появлению фазового наклёпа. Таким образом, применение магнитного поля в качестве инструмента, воздействующего на мартенситное превращение, позволило впервые доказать стадию роста мартенситных кристаллов для сплавов с различной морфологией мартенсита.

Результаты экспериментов с использованием сильных постоянных магнитных полей показали влияние магнитного поля не только на мартенситное, но и на перлитное и бейнитное пре-

вращения. Под влиянием постоянного магнитного поля С-образная диаграмма развития изотермического мартенситного превращения сдвигается в сторону более высоких температур, при этом происходит сокращение инкубационного периода, существенно увеличивается степень мартенситного превращения, расширяется температурный интервал его развития.

Чрезвычайно плодотворным оказалось сотрудничество В.М. Счастливым с профессором ЮУрГУ Д.А. Мирзаевым в установлении **взаимосвязи мартенситного и бейнитного превращений** [49]. В работах [50–52] был экспериментально установлен ступенчатый характер полиморфного гамма-альфа-превращения в сплавах на основе железа в зависимости от скорости охлаждения; проведён экспериментальный и теоретический анализ причин проявления многоступенчатой зависимости положения температуры начала превращения в сталях от скорости охлаждения. Полученные закономерности использованы для анализа взаимосвязи мартенситного и бейнитных превращений в легированных сталях и предложена новая концепция, позволившая доказать, что существование верхнего и нижнего бейнитов в сталях генетически связано с наличием нескольких кинетических ступеней гамма-альфа-превращения в железе, а не с изменением структуры выделяющихся карбидов, как считалось ранее [53].

Исследования кинетики бейнитного превращения, влияния количества остаточного аустенита на механические свойства сталей, проведённые В.Д. Садовским в 40–50-е годы, были продолжены позднее сотрудниками лаборатории и обобщены в монографии В.М. Счастливым, Ю.В. Калетиной и Е.А. Фокиной [54]. Показано, что увеличение количества остаточного аустенита может быть достигнуто несколькими способами: в результате термической стабилизации мартенситного превращения или измельчения зерна аустенита, при бейнитном превращении, а также при повторной закалке стали из межкритического интервала температур, при которой образуется некоторое количество «ревертированного» аустенита, в частности, способствующего увеличению хладостойкости криогенных сталей.

Результаты исследований **перлитного превращения и структуры перлита**, полученные сотрудниками лаборатории под руководством В.М. Счастливым за последние 20 лет, позволили опровергнуть представления о том, что перлит является наиболее стабильной структурной составляющей стали. Особое внимание в данных исследованиях было уделено явлениям, происходящим при отжиге в структурных составляющих перлита, а именно: сфероидизации, коагуляции и коалесценции цементита, полигонизации и рекристаллизации феррита, а также трансформации цементита при деформа-



Заведующая лабораторией
физического материаловедения д.т.н.
Т.И. Табатчикова (2008 – 2017 г.г.)

ции, наследованию перлитом дефектов кристаллического строения от горячедеформированного аустенита. При этом впервые было учтено влияние дефектов кристаллического строения в цементитной составляющей перлита на процессы, происходящие при нагреве и деформации, в частности, при прокатке, кручении и фрикционном нагружении [55].

При исследовании перлитного превращения, происходящего в неравновесных условиях (при 500 °С), впервые показано, что ферритная составляющая «свежеполученного» тонкопластинчатого перлита характеризуется твёрдорастворным упрочнением (содержанием в нем углерода сверх равновесного состава). С практической точки зрения важно, что тонкопластинчатый перлит имеет повышенную твёрдость, прочность и износостойкость [56], это обусловлено его высокой способностью к деформационному упрочнению.

В.И. Зельдовичем, И.В. Хомской, А.Э. Хейфецем, Н.Ю. Фроловой с начала 90-х годов XX в. совместно с РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, ведутся исследования явлений локализации высокоскоростной деформации, **структурных и фазовых превращений в сплавах на основе железа и меди, подвергнутых действию мощных квазисферических сходящихся ударных волн**. Отличительной особенностью исследований, проводимых в рамках данной тематики, является использование специально подобранных металлов и сплавов, способных фиксировать результаты воздействий, протекающих в микросекундные интервалы времени, в виде характерных микроструктурных изменений. При таком подходе нагружаемый образец рассматривается не только как объект исследования, но и как зонд, позволяющий изучать механизм и динамику внешнего воздействия. В результате проведённых исследований были выяснены особенности распространения и взаимодействия ударных волн



(a)

(б)

Субмикроструктурная и нанокристаллическая структура титана (а) после ДКУП при 530 °С, два прохода (а) и меди после ДКУП, 4 прохода (б)

и условия протекания кумуляции энергии при различных схемах нагружения. Установлена взаимосвязь между параметрами ударно-волнового воздействия: давлением (40–300 ГПа), высокоскоростной деформацией (10^5 – 10^7 с⁻¹), температурой (100–2000 °С) и структурными изменениями в сталях и сплавах на различных масштабных уровнях (макроскопическом, мезоскопическом и микроскопическом) [57, 58].

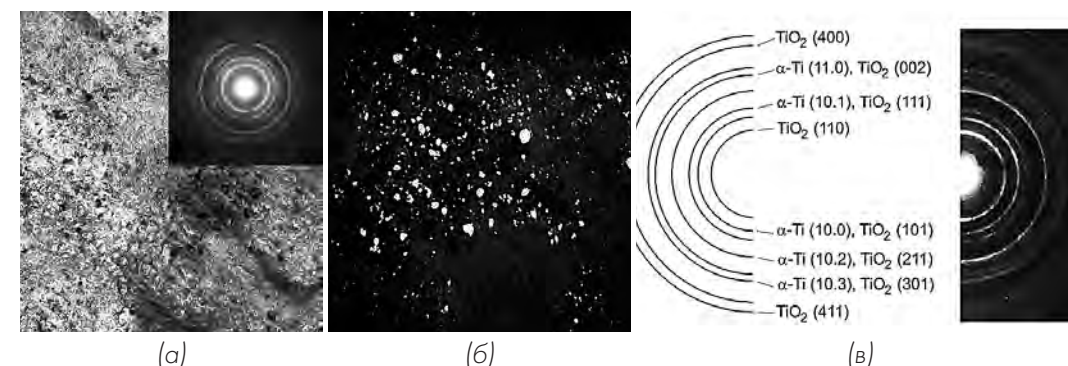
Другим новым научным направлением этой группы является получение объёмных наноструктурированных металлов и сплавов методом высокоскоростного прессования. Проводится изучение структуры и свойств наноструктурированных титана, меди и сплавов на их основе, полученных новым высокоскоростным методом динамического канально-углового прессования (ДКУП). Исследования ведутся совместно с авторами метода из РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск. Установлены закономерности структурообразования в металлах и сплавах при использовании метода ДКУП, отличительной особенностью которого является комбинированное воздействие высокоскоростной деформации сдвига, ударно-волновой деформации сжатия и температуры. Предложен геометрический метод определения величины равномерной сдвиговой деформации при канально-угловом прессовании, основанный на металлографическом исследовании пространственной ориентированности структурных составляющих. Обнаружено, что в меди происходят закономерно повторяющиеся процессы фрагментации, динамической полигонизации и динамической рекристаллизации. Структура сплавов меди формируется за счёт фрагментации, динамической полигонизации и деформационного старения с выделением наноразмерных частиц вторых фаз. Показана применимость метода для измельчения структуры этих материалов до наноразмерного уровня за один-четыре цикла прессования и повышения прочностных характеристик в 1,4–3,3 раза, при сохранении удовлетворительной пластичности [59,60].

В 2014–2017 гг. В.М. Счастливым, В.И. Зельдовичем, В.М. Гундыревым выполнен цикл исследований механизма мартенситных превращений в монокристаллах среднеуглеродистой стали и никелида титана [61,62]. Построен новый вариант кристаллографической теории мартенситного превращения в сплавах железа, основанный не на общепринятой деформации Бейна, а на первом сдвиге из двухсдвиговой теории Курдюмова. Определены точные ориентационные соотношения между высокотемпературной фазой (аустенитом) и мартенситом, необходимые для проверки теории. В новом варианте теории не требуется нереальный поворот мартенситного кристалла на ~10 град. (как в теории Бейна), а достаточно сделать поворот на ~1,5 град.. Такой поворот в реальности может быть осуществлен дислокационными перемещениями. Кроме того, в новом варианте выявляется общность явлений двойникования и мартенситного превращения, так как системы

сдвига одинаковы. Таким образом, новый вариант кристаллографической теории лучше описывает механизм мартенситного превращения, чем существующий. Положения теории также применимы для описания мартенситного превращения $B2 \rightarrow B19'$ в никелиде титана.

Группа Л.Г. Коршунова, организованная в 1979 г., активно развивает перспективное направление – исследование интенсивной пластической деформации трением. Для этого были спроектированы и изготовлены оригинальные установки, позволяющие проводить трибологические испытания металлов и сплавов при различных условиях фрикционного нагружения (температуры, среды, нагрузки, скорости скольжения). Были усовершенствованы методики электронно-микроскопического и рентгеновского исследования тонких поверхностных слоев сталей и сплавов, разработан методика исследования динамики структурных превращений, происходящих в зоне фрикционного контакта металлов и сплавов, основанная на регистрации и анализе э.д.с. трения (постоянной составляющей). Созданная группой надежная экспериментальная база позволила далее получить ряд новых принципиально важных научных результатов, расширяющих современные представления о физической природе процессов, происходящих в поверхностных слоях металлов и сплавов при трении и изнашивании. Так, в частности, был выполнен детальный структурный анализ напряжений, возникающих в зоне скользящего металлического контакта. Показано влияние мартенситных гамма-альфа, гамма-эпсилон, и магнитных превращений на основные трибологические свойства сталей аустенитного класса. Обнаружено сильное положительное влияние деформационного динамического старения на сопротивление различным видам изнашивания (адгезионное, абразивное, усталостное) мартенситных и аустенитных сталей. Впервые установлено, что воздействие трения скольжения приводит к формированию нанокристаллических структур в тонком (~10 мкм) поверхностном слое практически любых контактирующих материалов, включая аморфные сплавы и закаленные инструментальные стали.

Разработаны новые износостойкие аустенитные стали и способы упрочнения поверхности титана и никелида титана. Новизна полученных результатов защищена 22 патентами России и авторскими свидетельствами СССР. По материалам исследований опубликованы сотни научных статей на русском и иностранных языках, они изложены в нескольких монографиях и справочниках [63–66]. Часть новых научных результатов внедрена на заводах Урала с большим экономическим эффектом (УРАЛМАШ, Уралбурмаш, УРАЛ АЗ). Сотрудники группы были отмечены разными премиями (имени Ленинского Комсомола, имени академика В.Д. Садовского, «МАИК Наука/Интерпериодика, Губернатора Свердловской области).



Структура поверхностного слоя титана VT1-0, деформированного трением с последующим нагревом при 450 °С

По-прежнему одним из важнейших научных направлений лаборатории является **формирование в сталях субмикроструктурной и нанокристаллической структуры за счёт сочетания фазового превращения и пластической деформации**. Исследовано влияние тепловой деформации на механизм фрагментации мартенситной структуры низкоуглеродистых легированных сталей, получены данные о положительном влиянии субмикроструктурной структуры при горячей пакетной прокатке, на ударную вязкость многослойных стальных композитов (Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, С.Ю. Дельгадо Рейна).

Продолжая традиционно важные и актуальные исследования высокоуглеродистых сталей, В.М. Счастливцев, Н.А. Терещенко и И.Л. Яковлева изучили структурные уровни деформации перлита в сталях эвтектоидного состава. Впервые ими показано, что причина охрупчивания при волочении заключается в формировании кристаллографически ориентированной колонии перлита в масштабах бывшего аустенитного зерна. На основании этих исследований рекомендованы критерии оптимизации химического состава арматурных сталей для шпал нового поколения скоростных и тяжелонагруженных железнодорожных магистралей.

Работы по ВТМО, впервые предложенной в ИФМ, получили новое развитие в последнее время, когда термомеханическая обработка вновь привлекла внимание исследователей как способ повышения прочности и хладостойкости низкоуглеродистых экономнолегированных сталей. Дело в том, что в последнее время для обеспечения высокой свариваемости трубных сталей наметилась тенденция к снижению содержания углерода в них, что, естественно, снижает их прочность. Поэтому возрос интерес к использованию при производстве хладостойких сталей процессов контролируемой прокатки и термомеханической обработки, являющихся одним из наиболее эффективных методов упрочнения стали и повышения ударной вязкости, поскольку позволяет одновре-

менно повысить прочность, вязкость и пластичность стали за счёт создания высокодисперсной фрагментированной структуры. Современные технологии производства труб разработаны в ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» и ФГУП ЦНИИЧермет имени И.П. Бардина в рамках проекта «Магистраль», соисполнителем работ выступал Институт физики металлов УрО РАН, лаборатория физического материаловедения. Разработка научных подходов к решению проблемы хладостойкости свариваемых сталей проводилась на основе изучения закономерностей фазовых превращений и установления взаимосвязи между структурой и свойствами низкоуглеродистых экономнолегированных сталей. В этом направлении были решены важные задачи: исследовано влияние температуры изотермического распада переохлаждённого аустенита на морфологию образующегося бейнита; определены условия получения бейнита с субзёрненным строением; показано влияние текстуры на хладостойкость [67, 68].

Предложен новый подход к анализу механических свойств листового проката из трубных сталей категорий прочности Х70-Х100. Выявлен структурный механизм повышения ударной вязкости горячекатаных ферритных сталей за счёт появления вторичных трещин расслоения в ходе разрушения. Роль трещин расслоения смоделирована в экспериментах на составных ударных образцах в широком диапазоне температур (В.М. Счастливцев,



Лаборатория физического материаловедения в 2012 г.

И.Л. Яковлева, Н.А. Терещенко, Т.И. Табатчикова, И.В. Гервасьева, Д.А. Мирзаев).

Круг научных интересов сотрудников лаборатории чрезвычайно широк – от чистых чёрных и цветных металлов до высокопрочных сплавов на железной, никелевой, медной основе. Среди наиболее важных разработок следует упомянуть инвары – сплавы, обладающие постоянным коэффициентом термического расширения, жаропрочные материалы для лопаток турбин, перспективные ферромагнитные материалы на основе сплавов Гейслера, сплавы на основе никеля и меди – подложки для сверхпроводящих кабелей 2-го поколения.

Исследования, проводимые лабораторией физического материаловедения в настоящее время, основываются на возможностях отдела электронной микроскопии «Испытательного центра нанотехнологий и перспективных материалов». Это позволяет детально изучать структуру металлов и сплавов, подвергнутых термической или термомеханической обработке, различным внешним воздействиям, находить взаимосвязь структуры со свойствами и таким образом определить механизм формирования комплекса свойств.

Научные направления лаборатории физического материаловедения развиваются по мере усложнения и расширения экспериментальных возможностей. С появлением в ИФМ новых методов исследования (просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, сканирующей электронной микроскопии), а также способов внешнего воздействия (ударно-волнового нагружения, интенсивной и высокоскоростной пластической деформации, фрикционного воздействия, магнитного поля высокой напряженности и др.) диапазон научных исследований заметно расширился. Отличительной особенностью лаборатории является не только высокий уровень фундаментальных исследований, но и их практическая направленность, в частности, для нужд РЖД, трубной промышленности, оборонной техники. В настоящее время лаборатория физического материаловедения представляет собой коллектив, в котором работают 24 сотрудника, из них академик РАН В.М. Счастливцев, 7 докторов и 7 кандидатов технических и физ.-мат. наук.

В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова

Список литературы

1. В.М. Счастливцев, Академик В.Д. Садовский и развитие физического материаловедения на Урале, УрО РАН, Екатеринбург (2010), 366 с.
2. В.Д. Садовский, Превращения переохлажденного аустенита (атлас диаграмм), Металлургиздат, Свердловск (1947), 56 с.
3. В.Д. Садовский, Н.П. Гоппе, Уральская металлургия, № 3, 43 (1937).

4. В.И. Зюзин, В.Д. Садовский, С.И. Баранчук, Труды ИММ УФАН (1941), Вып. 10, 119.
5. В.Д. Садовский, Изв. АН СССР. ОТН **3**, 219 (1945).
6. В.Д. Садовский, В сб. *Фазовые превращения в железоуглеродистых сплавах*. Машгиз, (1950), С. 65.
7. Л.В. Смирнов, Е.Н. Соколов, В.Д. Садовский, ДАН СССР **103**, 609 (1955).
8. Л.В. Смирнов, Е.Н. Соколов, В.Д. Садовский, Труды ИФМ УФАН (1956), Вып. 18, 36.
9. Е.Н. Соколов, В.Д. Садовский, ФММ **19**, 226 (1965).
10. В.Д. Садовский, К.А. Малышев, Н.В. Вьяль, Изв. сектора физ.-хим. анализа АН СССР, **20**, 345 (1950).
11. К.А. Малышев, В.Д. Садовский, Б.Г. Сазонов, ДАН СССР **76**, 61 (1951).
12. В.Д. Садовский, К.А. Малышев, Б.Г. Сазонов, *Фазовые и структурные превращения при нагреве стали*, Metallurgizdat, Москва-Свердловск (1954), 183 с.
13. В.Д. Садовский, Б.К. Соколов, *Проблемы материаловедения и термической обработки*, Машгиз, Москва (1960), С. 5.
14. В.Д. Садовский, *Структурная наследственность в стали*, Metallurgiya, Москва (1973), 205 с.
15. В.Д. Садовский, Н.М. Родигин, Г.М. Филончик, Л.В. Смирнов, И.Г. Факидов, ФММ **12**, 302 (1961).
16. М.А. Кривоглаз, В.Д. Садовский, ФММ **18**, 502 (1964).
17. В.Д. Садовский, Л.В. Смирнов, Е.А. Фокина, П.А. Малинен, И.П. Со рокин, ФММ **24**, 918 (1967).
18. М.А. Кривоглаз, В.Д. Садовский, Л.В. Смирнов, Е.А. Фокина, *Закалка стали в магнитном поле*, Наука, Москва (1977), 120 с.
19. В.М. Счастливцев, Л.Н. Ромашев, В.Д. Садовский, ФММ **67**, 629 (1989).
20. В.Д. Садовский, Н.П. Чупракова, Труды ИММ УФАН (1945), Вып. 6, 56.
21. Е.Н. Соколов, В.Д. Садовский, В сб. *Проблемы материаловедения и термической обработки*, Машгиз, Москва (1956). С.99.
22. В.Д. Садовский, А.Б. Кутьин, Н.М. Гербих, ДАН СССР **305**, 611 (1989).
23. А.Б. Кутьин, В.Д. Садовский, Н.М. Гербих, О.Э. Маевская, ФММ **10**, 175 (1990).
24. К.А. Малышев, В.Д. Садовский, Б.Г. Сазонов, В сб. *Термическая обработка металлов*. Москва-Свердловск (1954), С.138.
25. В.Д. Садовский, К.А. Малышев, Е.Н. Соколов, Л.В. Смирнов, Г.Н. Богачева, В.Т. Бирюлин, С.Н. Петрова, В сб. *Исследование по жаропрочным сплавам*, Изд. АН СССР, Т. 2, (1957), С.76.
26. Е.Н. Соколов, В.Д. Садовский, ФММ **4**, 187 (1957).
27. Г.Н. Богачева, В.Д. Садовский, Труды ИФМ УФАН (1956), Вып. 17, 125.
28. Г.Н. Богачева, В.М. Счастливцев, ФММ **16**, 521 (1963).
29. В.М. Счастливцев, Д.П. Родионов, В.Д. Садовский, Л.В. Смирнов, ФММ **30**, 1238 (1970).
30. В.М. Счастливцев, В.П. Дрозд, А.В. Ожиганов, ФММ **32**, 805 (1971).
31. А.В. Ожиганов, В.М. Счастливцев, В.Д. Садовский, Д.П. Родионов, Л.В. Смирнов, ФММ **32**, 1326 (1971).
32. В.М. Счастливцев, В.Д. Садовский, В.П. Дрозд, ФММ **33**, 151 (1972).
33. Д.П. Родионов, В.М. Счастливцев, *Стальные монокристаллы*, УрО РАН, Екатеринбург, (1996), 124 с.
34. В.И. Зельдович, И.В. Хомская, О.С. Ринкевич, ФММ **3**, 5 (1992).
35. Ю.В. Хлебникова, Д.П. Родионов, В.А. Сазонова, Л.Ю. Егорова, Ю.В. Калетина, ФММ **114**, 818 (2013).
36. Ю.В. Хлебникова, В.А. Сазонова, Д.П. Родионов, Н.Ф. Вильданова, Л.Ю. Егорова, Ю.В. Калетина, И.Л. Солодова, В.М. Умова, ФММ **108**, 267 (2009).
37. В.М. Счастливцев, ФММ **38**, 793 (1974).
38. В.М. Счастливцев, Т.В. Артемова, ФММ **36**, 1316 (1973).
39. В.М. Счастливцев, Н.В. Копцева, ФММ **42**, 837 (1976).
40. В.М. Счастливцев, И.Л. Яковлева, ФММ **43**, 358 (1977).
41. В.Д. Садовский, В.М. Счастливцев, в кн. *Материаловедение и термическая обработка стали и чугуна*, Справ. изд., Под общ. ред. А.Г. Рахштадта и др., Интернет Инжиниринг, Москва (2005), Т. 2, С. 237.
42. В.Д. Садовский, В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, *Лазерный нагрев и структура стали: Атлас микроструктур*, Изд-во УрО АН СССР, Свердловск (1989) 100 с.
43. И.Л. Яковлева, В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, ФММ **76**, 86 (1993).
44. И.Л. Яковлева, В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, Д.А. Мирзаев А.Л. Осинцева, ФММ **79**, 152 (1995).
45. В.М. Счастливцев, Ю.В. Калетина, Е.А. Фокина, *Мартенситное превращение в магнитном поле*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2007), 322 с.
46. В.Д. Садовский, Л.Н. Ромашев, ДАН СССР **238**, 342 (1978).
47. В.М. Счастливцев, Л.Н. Ромашев, И.Л. Яковлева, В.Д. Садовский, ФММ **51**, 773 (1981).
48. V.D. Sadovsky, V.M. Schastlvtsev, L.N. Romashev, J. Phys. **43**, 529 (1982).
49. В.М. Счастливцев, Д.А. Мирзаев, И.Л. Яковлева, *Структура термически обработанной стали*, Metallurgiya, Москва (1994), 288 с.
50. Д.А. Мирзаев, М.М. Штейнберг, Т.Н. Пономарёва, В.М. Счастливцев, ФММ **47**, 125 (1979).
51. Д.А. Мирзаев, С.Е. Карзунов, В.М. Счастливцев, И.Л. Яковлева, Е.В. Харитоновна, ФММ **61**, 331 (1986).
52. Д.А. Мирзаев, С.Е. Карзунов, В.М. Счастливцев, И.Л. Яковлева, Е.В. Харитоновна, ФММ **62**, 318 (1986).
53. В.М. Счастливцев, МитОМ, № 7, 24 (2005).
54. В.М. Счастливцев, Ю.В. Калетина, Е.А. Фокина, *Остаточный аустенит в легированных сталях*, РИО УрО РАН, Екатеринбург (2014), 236 с.
55. В.М. Счастливцев, Д.А. Мирзаев, И.Л. Яковлева, К.Ю. Окишев, Т.И. Табатчикова, Ю.В. Хлебникова, *Перлит в углеродистых сталях*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2006), 310 с.
56. В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, А.В. Макаров, Л.Ю. Егорова, И.Л. Яковлева, ФММ **88**, 94 (1999).
57. И.В. Хомская, В.И. Зельдович, Б.В. Литвинов, Н.П. Пурыгин, ФММ **98**, 4, 88 (2004).
58. И.В. Хомская, А.Э. Хейфец, В.И. Зельдович, Б.В. Литвинов, Н.П. Пурыгин, ФММ **106**, 312 (2008).
59. В.И. Зельдович, Е.В. Шорохов, С.В. Добаткин, Н.Ю. Фролова, А.Э. Хейфец, И.В. Хомская, П.А. Насонов, А.А. Ушаков, ФММ **111**, 439 (2011).
60. И.В. Хомская, Е.В. Шорохов, В.И. Зельдович, А.Э. Хейфец, Н.Ю. Фролова, П.А. Насонов, А.А. Ушаков, И.Н. Жиглев, ФММ **111**, 639 (2011).

61. В.М. Гундырев, В.И. Зельдович, ФММ **115**, 1035 (2014).
62. В.М. Гундырев, В.И. Зельдович, В.М. Счастливцев, ДАН **468**, 26 (2016).
63. Л.Г. Коршунов, ФММ, № 8, 3 (1992).
64. Л.Г. Коршунов, А.В. Макаров, Н.Л. Черненко, ФММ **78**, 128 (1994).
65. Л.Г. Коршунов, В.А. Шабашов, Н.Л. Черненко, В.П. Пилюгин, МИТОМ, № 12, 24 (2008).
66. Ю.Г. Векслер, Л.Г. Коршунов в кн. *Металловедение и термическая обработка стали и чугуна*, Спр. изд., Под общ. ред. А.Г. Рахштадта и др., Интермет Инжиниринг, Москва (2004), Т.1, С.151.
67. В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, А.А. Круглова, Е.И. Хлусова, В.В. Орлов, Вопросы материаловедения **59** (3), 26 (2009).
68. В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, Л.Ю. Егорова, И.В. Гервасьева, А.А. Круглова, Е.И. Хлусова, В.В. Орлов, ФММ **108**, 314 (2010).

ЛАБОРАТОРИЯ

ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Пушин Владимир Григорьевич, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н., профессор
- Астафьев Владимир Владимирович, младший научный сотрудник
- Баимова Юлия Айдаровна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Белослудцева Елена Сергеевна, младший научный сотрудник
- Бродова Ирина Григорьевна, главный научный сотрудник, д.т.н., профессор
- Буйнова Людмила Николаевна, старший инженер, к.ф.-м.н.
- Гохфельд Николай Викторович, младший научный сотрудник
- Елкина Ольга Аркадьевна, научный сотрудник
- Кайгородова Лариса Израильевна, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Кунцевич Татьяна Эдуардовна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Куранова Наталия Николаевна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Лукьянов Александр Владимирович, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Марченкова Елена Борисовна, научный сотрудник
- Насонова Тамара Михайловна, старший лаборант
- Окулов Артем Владимирович, инженер-исследователь
- Петрова Анастасия Николаевна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Распосиенко Дмитрий Юрьевич, младший научный сотрудник
- Свирид Алексей Эдуардович, ведущий инженер
- Солодов Кирилл Антонович, инженер-исследователь
- Турхан Юлиан Эсперович, главный специалист, к.ф.-м.н.
- Уксусников Алексей Николаевич, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Устюгов Юрий Михайлович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Ширинкина Ирина Геннадьевна, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Яблонских Татьяна Ивановна, ведущий технолог

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ

История становления и развития исследований структурных и фазовых превращений в Институте физики металлов Уральского отделения РАН неразрывно связана с историей создания и становления самого института. В 2017 г. Институту физики металлов (ИФМ), самому крупному институту УрО РАН, исполняется 85 лет. В приказе директора Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ) академика А.Ф. Иоффе была выделена группа сотрудников организуемого Уральского физико-технического института (УралФТИ) с самостоятельным бюджетом с 1 января 1932 г., а исследования фазовых превращений были сформулированы как приоритетные в ряду основных направлений его научной деятельности (магнитные и электрические явления, фазовые превращения, пластическая деформация в металлах и сплавах, электронография). В 1932 г. в группу по изучению фазовых превращений в сплавах были включены Г.В. Курдюмов, А.П. Комар, Я.И. Френкель, И.В. Исаичев; чуть позже, в 1934 г., в нее зачислили М.А. Блохина и А.М. Елистратова. Группу электронографии в 1932 г. возглавил В.И. Архаров. В военное время, в 1942 г., сотрудниками лаборатории фазовых превращений стали А.А. Смирнов, работавший в УралФТИ с 1932 г, в будущем ставший вице-президентом АН УССР, и С.Д. Герцрикен. В последующем они стали известными советскими учёными, определившими заметное развитие отечественной и мировой науки в области физики металлов и сплавов, фазовых превращений и материаловедения, физических и структурных методов исследований.

Длительное время, вплоть до 1948 г., руководство изучением фазовых превращений в УралФТИ осуществлял Антон Пантелеймонович Комар. В 1935 г. А.П. Комару была присвоена учё-



Комар Антон Пантелеймонович

ная степень кандидата физико-математических наук, степень доктора физико-математических наук и звание профессора он получил в 1943 г., а в 1948 г. был избран действительным членом АН Украинской ССР. В те годы неоднократно менялись не только названия и ведомственная принадлежность Института, но и его структурных подразделений. Созданная в 1932 г. группа по изучению фазовых превращений в сплавах под руководством А.П. Комара в 1934 г. трансформировалась в сектор, а в 1936 г. – в лабораторию фазовых превращений.

Постепенно не только создавалась и развивалась материально-техническая база института и ставились фундаментальные исследования, но, прежде всего, налаживалось самое тесное сотрудничество с промышленными предприятиями и вузами Урала, в которых многие его сотрудники преподавали. Так, А.П. Комар десять лет руководил созданными им кафедрой рентгеноструктурного анализа и рентгеновской лабораторией Уральского государственного университета (1937–1947 гг.).

В 30-е гг. прошлого века на Урале бурно развивалась машиностроительная и металлургическая промышленность. Требовался технический контроль изделий в промышленности и повышение их качества. Под руководством А.П. Комара в этот период разрабатывались и запускались установки по промышленной рентгенокопии на уральских заводах Уралмаш, Турбомоторном, Уралхиммаш, УАЗ; Горьковском заводе № 197 им. В.И. Ленина и многих других. На ряде предприятий по его инициативе были организованы заводские научно-исследовательские лаборатории.

Начиная с 1936 г., штаты УралФТИ, уже полностью развёрнутого в Свердловске, активно пополнялись молодыми специалистами, в том числе выпускниками Свердловских вузов. В 1937 г. в лабораторию фазовых превращений после окончания Уральского госуниверситета был зачислен и Николай Николаевич Буйнов (1909 г.р.). Первая научная работа, выполненная в лаборатории и составившая основу его будущей кандидатской диссертации, была посвящена изучению процессов атомного упорядочения в сплавах рентгенографическим методом. В те времена экспериментальные методики и установки научные сотрудники создавали сами. Н.Н. Буйнову пришлось сконструировать и собрать аппарат для рентгеноструктурного анализа, изготовить самодельную разборную рентгеновскую трубку. В 1943 г. он под руководством А.П. Комара защитил кандидатскую диссертацию на тему «Рентгенографическое исследование степени дальнего порядка в сплавах Au–Cu», результаты которой стали классическими и по сути заложили мощное научно-техническое направление по разработке электроконтактных материалов, до сих пор развиваемое

в ИФМ. В этом же году докторскую диссертацию защитил А.П. Комар. Важно отметить, что в обсуждении результатов экспериментальных исследований, полученных в лаборатории в те годы, уже активно участвовали физики-теоретики, работавшие в УралФТИ, – В.Е. Рудницкий и А.А. Смирнов.

Адриан Анатольевич Смирнов после репрессий против С.П. Шубина вплоть до начала Великой Отечественной войны был исполняющим обязанности заведующего теоретическим отделом УралФТИ, а после возвращения с фронта по ранению в 1942–1949 гг. стал одним из ведущих научных сотрудников лаборатории фазовых превращений. Теоретическим исследованиям процессов атомного упорядочения в сплавах, начатым еще в 1930-е гг., А.А. Смирнов посвятил всю свою научную деятельность после отъезда в Киев, возглавив кафедру теоретической физики Киевского политехнического института (1950–1957 гг.), затем Киевского университета (1955–1962 гг.), являясь членом Президиума АН УССР (1963–1965 гг.), затем вице-президентом АН УССР (1970–1974 гг.), главным редактором Украинского физического журнала (1972–1988 гг.).

А.П. Комар и Н.Н. Буйнов чувствовали и понимали силу новых структурных методов и поэтому по праву стали основоположниками развития методов рентгенографии, электронной микроскопии и промышленной рентгенокопии на Урале. В 1946 г. уже после войны для расширения возможностей рентгеновской просвечивающей дефектоскопии по инициативе и под руководством А.П. Комара в ИФМ было начато создание первого в СССР бетатрона. А в 1947 г. в ИФМ под руководством Н.Н. Буйнова стартовал новый важный этап в развитии исследований структурных и фазовых превращений на Урале с помощью просвечивающей электронной микроскопии, когда по распоряжению академика И.П. Бардина, тогда одновременно председателя Президиума УФАНа и вице-президента АН СССР, в институте был установлен просвечивающий электронный микроскоп марки EMI-2, фирмы «Radio Corporation», США. Это был один из двух электронных микроскопов, присланных из США и ставших первыми электронными микроскопами, появившимися в Советском Союзе. С них и началась эра электронной микроскопии в СССР.

В течение длительного времени EMI-2 на Урале был единственным работающим электронным микроскопом, и в лаборатории всегда было много заказов из других институтов – от геологов, химиков, металлургов, медиков. Уже тогда Н.Н. Буйнову, организовавшему и возглавившему группу электронной микроскопии (1947–1956 гг.), пришлось обеспечивать на образцах, предоставляемых пользователями, решение самых разных микроструктурных научно-исследовательских задач. Основная тематика ра-



Буйнов Николай Николаевич

бот, выполняемых под руководством А.П. Комара и Н.Н. Буйнова в те далекие годы, была очень разнообразной и включала пионерные фундаментальные исследования структуры, физических свойств, механизмов и кинетики старения в алюминиевых сплавах и атомного упорядочения в магнитных и немагнитных сплавах (альни, магнико, кунифе, сплавы Cu–Pd, Au–Cu, Au–Zn). Совместно с профессором М.В. Якутовичем начались микроструктурные исследования механизмов деформации алюминиевых сплавов. Вместе с профессорами В.Д. Садовским и К.А. Малышевым изучались особенности структуры и фазового состава различных сталей. Тесное сотрудничество и взаимодействие в комплексных междисциплинарных научных исследованиях всегда отличало коллектив учёных и инженеров института и всячески поддерживалось и укреплялось его руководителями.

В 1948 г. А.П. Комар был избран действительным членом АН УССР и переведен в Москву на должность заместителя директора Физического института имени П.Н. Лебедева АН СССР (1948–1950 гг.). В 1950 г. он был назначен директором Ленинградского физико-технического института (1950–1957 гг.), затем заведующим кафедрой ядерной физики Ленинградского политехнического института (1951–1969 гг.) и лаборатории рентгеновских и гамма-лучей (1957–1963 гг.). В Ленинградском физтехе, где А.П. Комар начинал научную деятельность в качестве аспиранта, он сосредоточился на работах по физике и технике ускорителей (бетатронов и синхроциклотронов) и активно включился в ядерные исследования. С его именем связано строительство ядерного научного центра в г. Гатчина, где в 1963 г. он организовал и возглавил одну из крупнейших лабораторий физики высоких энергий ЛФТИ им. А.Ф. Иоффе (1963–1976 гг.).

К сожалению, после отъезда А.П. Комара из Свердловска лаборатория фазовых превращений была расформирована. Группа электронной микроскопии под руководством Н.Н. Буйнова была переведена в состав лаборатории физического металловедения, в которой она функционировала до 1956 г. Впоследствии, в основном на исходной базе лаборатории фазовых превращений и рентгеноструктурного анализа возникли лаборатории низких температур (с 1954 г.), фазовых превращений (с 1956 г.), рентгеноспектрального анализа (с 1958 г.) и нейтронографии (в 1963 г.). Заведующими этими лабораториями стали ученики и соратники А.П. Комара: Н.В. Волкенштейн, Н.Н. Буйнов и С.К. Сидоров.

Особенностью научно-исследовательской деятельности лаборатории фазовых превращений было наличие к этому времени в составе её научного оборудования нескольких электронных микроскопов и, по-прежнему, электронно-микроскопические исследования проводились не только в интересах лаборатории и института, но и всего Уральского региона. В лаборатории очень хорошо были освоены методы оксидных и угольных реплик, а затем и тон-

ких фольг, что позволяло изучать структурно-морфологические особенности – следы скольжения, состояние границ зёрен, форму и размеры частиц избыточных фаз на разных стадиях распада пересыщенных твёрдых растворов. В середине 1960-х гг. в технике пробоподготовки для просвечивающей электронной микроскопии метод тонких фольг становится основным. В институте первые тонкие фольги были получены при изучении промышленных сплавов АЦМ и В95, и с этого момента метод начинает распространяться по различным лабораториям института.

Наряду с обычной рентгенографией, важным методом изучения тонкой структуры стареющих сплавов был метод малоуглового диффузного рассеяния рентгеновских лучей. В 1960-е гг. Н.Н. Буйнов стал одним из основоположников применения данного метода к изучению ранних стадий старения наряду с Гинье и Престонном, а у нас в стране – с Ю.А. Багаряцким, М.А. Елистратовым и Ю.Д. Тяпкиным. Завершают большой цикл работ Н.Н. Буйнова защита диссертации на соискание доктора физико-математических наук «Распад пересыщенных твёрдых растворов» (1963 г.) и публикация монографии с тем же названием в соавторстве с Р.Р. Романовой.

В 60-е годы под руководством Н.Н. Буйнова защитили кандидатские диссертации научные сотрудники лаборатории Р.Р. Романова (1961 г.), В.Г. Ракин (1963 г.), О.Д. Шашков (1963 г.), А.В. Добромыслов (1967 г.), Т.В. Щеголева (1968 г.), М.Ф. Комарова (1969 г.), В.А. Возилкин (1971 г.), Р.А. Караханян (1971 г.), Г.В. Павлова (1971 г.), С.В. Сударева (1971 г.). Исследованием новых титановых сплавов руководила Р.М. Леринман, защитившая диссертацию по стали ещё в 1947 г. под руководством В.Д. Садовского. А в конце 1960 – начале 1970-х гг. в лабораторию пришла целая группа студентов, молодых научных сотрудников и аспирантов (Н.Н. Вяткин, Т.Л. Треногина, В.В. Глебов, Л.И. Кайгородова, А.Н. Уксусников, В.Г. Пушин, В.А. Бычков, О.А. Елкина, В.А. Ивченко, В.Д. Суханов, А.Н. Барановский, А.Б. Телегин, Ю.М. Устюгов, Е.Г. Федорова и др.). Многие из них довольно быстро подготовили и защитили кандидатские диссертации и составили уже четвёртое поколение научных специалистов лаборатории фазовых превращений.

В 1960–1970-е гг. работы Н.Н. Буйнова приобрели широкую известность. Сформировалась и получила дальнейшее развитие и признание в СССР созданная им в лаборатории фазовых превращений школа исследователей-микроструктурщиков. Длительное время он являлся координатором исследований учёных нашей страны по актуальным вопросам старения сплавов, организатором всесоюзных совещаний по стареющим сплавам и бесменным председателем их оргкомитетов, представлял эту тематику и в редколлегии всесоюзного научного журнала АН СССР «Физика металлов и металловедение». Кроме того, Н.Н. Буйнов

и сотрудники лаборатории принимали самое активное участие во всесоюзных конференциях, посвящённых фазовым превращениям и прочности; рентгеноструктурному анализу и электронной микроскопии. Н.Н. Буйнов входил в состав комиссий по электронной микроскопии и рентгенографии при АН СССР.

В те годы по-прежнему большое внимание в лаборатории уделялось работам в интересах ведущих отраслевых институтов и промышленных предприятий СССР: ВИЛС, ВИАМ, ЦНИИЧМ (г. Москва), ВСНПО (г. Верхняя Салда), Уралмаш, КУМЗ, оптико-механического (г. Свердловск), других институтов и заводов Урала и страны. Среди приоритетных работы по созданию и изучению новых авиационных алюминиевых, никелевых и титановых сплавов конструкционного назначения, основанных на разных принципах легирования и способах обработки, термических и термомеханических технологий для улучшения эксплуатационных характеристик сталей и сплавов. Проводились также другие практически важные прикладные исследования, в том числе в интересах военно-промышленного комплекса.

Активно велись и фундаментальные исследования. Всё больший объём начали занимать комплексные исследования цветных сплавов методами электронной микроскопии. Детально изучались структурные и фазовые превращения в сплавах на основе алюминия, титана, никеля, меди, тугоплавких металлов, сплавах железа и сталях, влияние термообработки и пластической деформации на кинетику и механизмы распада, атомного упорядочения и мартенситного превращения. Как и А.П. Комар, Н.Н. Буйнов плодотворную научную деятельность всегда совмещал с активной научно-организационной и педагогической работой, читая лекции на физико-техническом факультете Уральского политехнического института.

Много сил за 47 лет научно-педагогической деятельности им было отдано подготовке научных кадров в области структурных и фазовых превращений. Среди его учеников доктора (О.Д. Шашков, Р.Р. Романова, А.В. Добромислов, Н.Н. Сюткин, В.Г. Пушин) и кандидаты физико-математических и технических наук (В.А. Возилкин, Л.И. Кайгородова, Р.А. Караханян, М.Ф. Комарова, Г.В. Павлова, В.Г. Ракин, С.В. Сударева, В.Д. Суханов, А.Н. Уксусников, Т.В. Щеголева). В 1965 г., спустя 20 лет после появления на Урале первого электронного микроскопа, благодаря авторитету Н.Н. Буйнова и результативным действиям дирекции ИФМ, в лаборатории фазовых превращений появился электронный микроскоп нового поколения JEM-150 (фирмы JEOL Ltd, Япония).

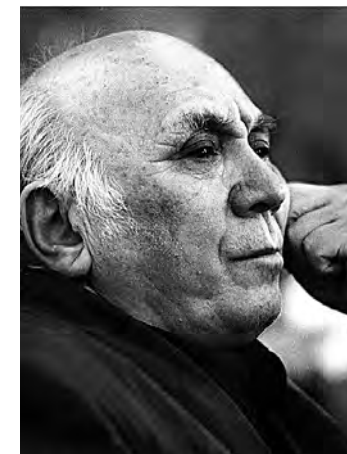
После ухода Н.Н. Буйнова с поста заведующего возглавляли лабораторию фазовых превращений



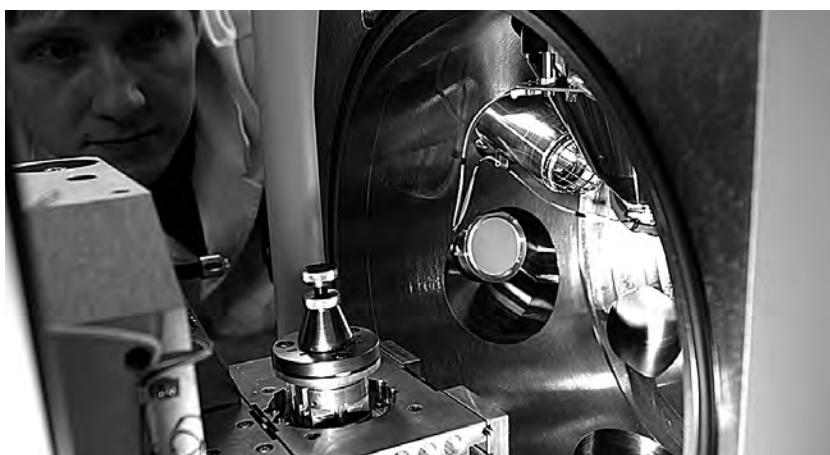
Шашков Олег Дмитриевич

Николай Николаевич Сюткин (1975–1981 гг.), Олег Дмитриевич Шашков (1981–1994 гг.), Владимир Григорьевич Пушин (1994–1996 гг.), Аркадий Васильевич Добромислов (1997–2004 гг.). Очередной важный этап развития электронной микроскопии в институте связан с приобретением в 1985 г. нового электронного микроскопа JEM-200CX (Япония) и организацией под руководством В.Г. Пушина Центра коллективного пользования (ЦКП) научного оборудования «Электронная микроскопия» при УНЦ АН СССР взамен большого количества индивидуально используемых в отдельных лабораториях технически и морально устаревших приборов. Чтение лекций В.Г. Пушиным с 1982 г. по настоящее время на физическом факультете УрГУ и металлургическом факультете УПИ (ныне УрФУ) и проведение практических занятий по электронной микроскопии не только поддерживали образовательный уровень обучающихся студентов старших курсов данных факультетов в области применения физических и структурных методов исследования в современной физике и материаловедении, но и позволяли привлекать наиболее одарённых выпускников на работу в лаборатории и центре. В 1999 г. ЦКП стал также структурным подразделением ИФМ, а в 2003 г. он был включен в сеть ЦКП Министерства образования и науки Российской Федерации, когда были выиграны гранты Федеральной целевой программы, что позволило приобрести новый уникальный сканирующий электронный микроскоп Quanta-200. В этом же году он был введён в составе трех секторов (пробоподготовки, руководитель А.Н. Уксусников; просвечивающей микроскопии, руководитель Т.П. Криницина; сканирующей микроскопии, руководитель Н.Н. Куранова) в организуемый Объединенный ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» при ИФМ УрО РАН. Вскоре по инициативе В.Г. Пушина благодаря активной поддержке директора ИФМ академика В.В. Устинова были приобретены еще два уникальных просвечивающих электронных микроскопа той же фирмы FEI Company (бывшей Philips), а сканирующий микроскоп Quanta-200 доукомплектован системой Pegasus.

В настоящее время Отдел электронной микроскопии ЦКП ИФМ УрО РАН, укомплектованный уникальными современными просвечивающими и растровыми аналитическими электронными микроскопами (Теспаи G2 30, CM-30, Quanta-200 Pegasus FEI Company, Нидерланды; JEM-200 CX, JEOL-ltd, Япония) с разнообразными функциональными возможностями, оборудованием для пробоподготовки, является одним из центров коллективного пользования, наиболее оснащённых в России и Российской академии наук уникальным высокоточным электронно-микроскопическим оборудованием последнего поколения, современными



Добромислов Аркадий Васильевич



методиками. Подготовлены высококвалифицированные специалисты, накоплен огромный практический опыт и обеспечиваются исследования фактически во всём Уральском регионе и далеко за его пределами. ЦКП был зарегистрирован Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии РФ как испытательная лаборатория, аккредитован на право проведения работ и сертифицирован (имеет 18 сертификатов от фирм-производителей оборудования FEI и EDAX). Кроме того, центр был признан компетентным и включен в систему добровольной сертификации «НАНОСЕРТИФИКА» ОАО «Российская корпорация нанотехнологий». Для калибровки оборудования имеются стандартные образцы метрологического контроля, разработан ряд уникальных методик исследований. Всё это позволяет осуществлять в центре в большом объеме как научно-исследовательские, так и экспертные работы в интересах института и других заинтересованных организаций. Вместе с широким использованием аналитической просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии при комплексных структурных исследованиях всегда плодотворно применяются методы электроно- и рентгенографии, в том числе очень эффективный метод диффузного рассеяния, а также измерения физико-математических свойств.

Говоря подробнее о научной тематике последних 20–30 лет, нельзя не отметить, что основными в ряду разнообразных научных интересов коллектива сотрудников лаборатории фазовых превращений как и прежде остаются разработка перспективных цветных интерметаллических сплавов и соединений, сталей, исследования структурных и фазовых превращений в них, физико-механических (в том числе магнитных, электрических и сверхпроводящих) свойств и их взаимосвязи со структурой, изучение влияния комплексного легирования, пластической деформации, высокого давления и других экстремальных внешних воздействий на структуру, свойства материалов, разработка физических основ термической и термомеханической обработок стареющих и атомно-упорядочивающихся сплавов, анализ предпереходных состояний, мартенситных переходов, выяснение возможностей совмещения и взаимовлияния структурно-фазовых превращений.

С 80-х гг. прошлого века в ИФМ под руководством В.Г. Пушина совместно с томскими учёными СФТИ при ТГУ и ИФПМ СО РАН был начат цикл оригинальных систематических исследований термоупругих мартенситных превращений и разработка металлургических основ создания интеллектуальных материалов с эффектами термомеханической памяти формы и прежде всего новых сплавов на основе никелида титана. Показано, что последние в данном классе материалов выделяются наиболее важными



Пушин Владимир Григорьевич

и подчас уникальными характеристиками, что делало их незаменимыми и обуславливало широкое, а в ряде отраслей (медицине, авиакосмической и специальной технике) исключительное практическое применение. Был создан и детально исследован целый ряд двойных и тройных сплавов с низко- и высокотемпературными (вплоть до 1000 °С) эффектами памяти формы. По материалам комплексных исследований предмартенситных явлений и мартенситных превращений в сплавах с памятью формы была защищена докторская диссертация В.Г. Пушиным в 1988 г. В этих исследованиях приняла участие также большая группа пришедших в лабораторию аспирантов и научных сотрудников. Были подготовлены и защищены шесть кандидатских диссертаций: в 1994 г. Л.И. Юрченко по исследованию влияния легирования на структуру и фазовые превращения в сплавах Ni-Ti и Ni-Al, в 1995 г. Л.Ю. Ивановой по детальному изучению процессов старения в сплавах никелида титана, в 1997 г. С.Б. Волковой по синтезу и рассмотрению быстрозакалённых сплавов квазибинарной системы TiNi-TiCu, в 2003 г. Т.Э. Кунцевич по синтезу и исследованию быстрозакалённых сплавов бинарной и квазибинарных систем Ti-Ni, TiNi-TiFe, TiNi-TiCo, а в 2010 г. Н.Н. Курановой по изучению структурных и фазовых превращений и свойств сплавов на основе никелида титана, подвергнутых интенсивной пластической деформации, в 2016 г. А.В. Пушиным по разработке и исследованиям сплавов Ti-Ni-Cu и Ni-Ti-Nf. Был получен ряд патентов на изобретения в 32 странах мира, издано десять монографий и опубликовано большое количество статей и докладов, в том числе с участием сотрудников других лабораторий ИФМ В.В. Кондратьева, А.В. Королева, Н.И. Коурова, Л.Г. Коршунова, В.В. Попова и Н.А. Черненко. В 90-е гг. прошлого века был выполнен большой цикл работ А.В. Добромисловым и Н.И. Талуц по изучению фазового состава и структуры модельных бинарных титановых сплавов, а О.А. Елкиной вместе с коллегами из УПИ – промышленных титановых сплавов.

А в середине 1990-х г.г. начались работы по исследованию высокоскоростной пластической деформации металлов и сплавов в моно- и поликристаллах с разным типом кристаллической решётки. В рамках этих работ в лаборатории фазовых превращений были изучены механизмы высокоскоростной пластической деформации в металлах с ГПУ-, ГЦК-, и ОЦК-структурами под действием сферически сходящихся ударных волн.

В эти же годы лаборатории становится одним из создателей и лидеров нового научного направления – получения объёмных наноструктурных материалов различного конструкционного и функционального назначения на основе ряда цветных металлов, их сплавов и интерметаллических соединений (сплавов алюминия, титана, никеля, меди, марганца и других металлов, интерметаллидов на основе систем Ti-Ni, Ti-Al, Ni-Al, Ni-Mn, Co-Pt, Fe-Pt,



Cu–Pd, Cu–Au и др.). В основе разработанных способов их получения было использование структурных и фазовых превращений при экстремальных внешних воздействиях (сверхбыстрой закалке расплава, высоком давлении, предельно большой пластической деформации прокаткой, волочением, равноканальным угловым прессованием, кручением под высоким давлением, обработки в магнитном поле, облучении), сочетаемых с оптимальным легированием, традиционными термическими и термомеханическими обработками. Были впервые получены и комплексно исследованы в ультрамелкозернистом состоянии высокопрочные стареющие сплавы на основе систем Al–Zn–Mg–Cu и Al–Li (Л.И. Кайгородова, В.Г. Пушин, Д.Ю. Распосиенко, В.А. Троянов, А.Н. Уксусников), атомно-упорядочивающиеся сплавы на основе благородных металлов (Л.Н. Буйнова, Н.В. Гохфельд, В.Г. Пушин), ряд жаропрочных сплавов и интерметаллических соединений на основе титана, никеля, марганца, алюминия и галлия (Е.С. Белослудцева, О.А. Елкина, В.В. Макаров, Е.Б. Марченкова, В.Г. Пушин), высокоэнтропийные сплавы (М.В. Ивченко, Н.И. Коуров, В.Г. Пушин) совместно с сотрудниками ИФМ УрО РАН, ИХТТ УрО РАН, ИМаш УрО РАН, ИМет УрО РАН, УрФУ, УГАТУ, СПбГУ, БГУ, МИСиС, ТГУ, ИМет РАН, ИФПМ СО РАН и др.).

В 2005 г. при оптимизации научно-организационной структуры в ИФМ УрО РАН под руководством доктора физико-математических наук профессора В.Г. Пушина на базе лаборатории фазовых превращений была создана лаборатория цветных сплавов. Она вместе с лабораториями механических свойств и физического металловедения вошла в состав отдела материаловедения (научный руководитель отдела академик РАН В.М. Счастливцев, зав. отделом член-корреспондент РАН В.В. Сагарадзе). В лабораторию цветных сплавов была включена также группа сотрудников лаборатории кристаллизации во главе с главным научным сотрудником, доктором технических наук Ириной Григорьевной Бродовой. Тематика этого небольшого сплочённого коллектива напрямую соответствовала новому названию и направлениям деятельности лаборатории. Ранее (с 1968 г.) научные исследования И.Г. Бродовой были тесно связаны с проблемой структурообразования в алюминиевых сплавах. Первые работы, выполненные под руководством заведующего лабораторией кристаллизации Владимира Олеговича Есина в тесном контакте с сотрудниками ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, касались разработки научных основ технологии получения профилированных изделий непосредственно из расплава по методу А.В. Степанова. Установленные в процессе эксперимента закономерности зарождения и строения двойниковых дендритов как специальной формы роста структурной составляющей алюминиевых сплавов позволили улучшить качество поверхности сложных металлических профилей. В 1981 г. по материалам этих исследований И.Г. Бродова защитила диссертацию

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Начиная с 1982 г., научные интересы группы были направлены на изучение взаимосвязи структуры и свойств алюминиевых сплавов в жидком и твёрдом состояниях. Совместно с коллегами из УПИ и УрГПУ, изучавшими структурно-чувствительные свойства металлических расплавов, были установлены общие закономерности строения алюминиевых расплавов разного химического состава и подтверждена теория их микронеоднородного состояния. Эти работы имели особое практическое значение в связи с началом промышленного применения температурно-временной обработки расплава в качестве эффективной технологии регулирования структуры и улучшения свойств слитков и отливок. На этапе разработки технологических рекомендаций для ряда заводов металлургического и машиностроительного профилей, таких как КУМЗ (г. Каменск-Уральский), ВСМОЗ (г. Верхняя Салда), Уральский турбомоторный завод (г. Свердловск) проводились эксперименты совместно с ведущими отраслевыми научно-исследовательскими институтами ВИЛС и ВИАМ (г. Москва). По результатам этих исследований были защищены три диссертации: И.В. Поленц (1992 г.) и Д.В. Башлыковым (2000 г.) на соискание ученой степени кандидата технических наук и И.Г. Бродовой (1995 г.) на соискание ученой степени доктора технических наук, а наиболее существенные результаты были изложены авторами в трёх монографиях, многих статьях и докладах.

В составе лаборатории цветных сплавов группа И.Г. Бродовой в соответствии с новыми действовавшими темами лаборатории включилась в исследование фазовых и структурных превращений в алюминиевых сплавах при интенсивной пластической деформации. Совместно с давним партнером лаборатории – коллективом УГАТУ (г. Уфа) был выполнен цикл работ по созданию в бинарных алюминиевых сплавах с тугоплавкими компонентами наноструктурных состояний кручением под высоким квазигидростатическим давлением. Был установлен ряд новых экспериментальных данных о кинетике деформационного растворения алюминидов переходных металлов и формировании пересыщенных твёрдых растворов на основе алюминия при интенсивной пластической деформации. Эти результаты составили основу диссертации И.Г. Ширинкиной на соискание учёной степени кандидата технических наук, защищённой в 2007 г.

С 2008 г. профессором И.Г. Бродовой с сотрудниками совместно с коллегами из РФЯЦ-ВНИИТФ успешно разрабатывается новый эффективный способ получения объёмных материалов с субмелкозернистой структурой – динамическое канально-угловое прессование (ДКУП), использующий в качестве источника внешней нагрузки энергию пороховых газов, что позволило повысить скорость деформирования до 10^4 – 10^5 с⁻¹. В рамках этих работ исследованы закономерности создания субмикроструктурных состояний в алюминиевых сплавах разных систем леги-

рования Al–Mn, Al–Mn–Mg, Al–Zn–Cu–Mg. Проанализированы механизмы формирования субмикроструктурной структуры в условиях совместного воздействия импульса давления ударной волны и простого сдвига в зависимости от типа упрочнения сплавов. Было показано, что данные материалы обладают широкой палитрой структурных состояний, отличающихся размером зерна, плотностью дислокаций, соотношением малоугловых и высокоугловых границ. В сотрудничестве с коллегами Института механики сплошных сред УрО РАН были проведены детальные исследования термодинамики высокоскоростного деформирования и влияния масштаба структуры на динамический процесс накопления энергии в алюминиевых сплавах, а также неустойчивости пластического течения и закономерностей локализации пластической деформации в субмикроструктурных сплавах Al–Mg–Mn. Основные результаты данной работы вошли в диссертацию А.Н. Петровой, защищённой в 2012 г. на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. В последние годы данное направление получило дальнейшее развитие при сотрудничестве с учёными Института проблем химической физики РАН. В частности, проводится многоплановое изучение взаимосвязи структуры ультрамелкозернистых материалов, динамических свойств и характера разрушения при ударно-волновом сжатии. Для широкого класса алюминиевых сплавов, полученных ДКУП, установлено повышение динамических характеристик упруго-пластического перехода в полтора-два раза по сравнению с крупнозернистыми аналогами при сохранении регламентированной откольной прочности. Фундаментальные результаты о взаимосвязи структуры алюминиевых сплавов в жидком и твёрдом состояниях были использованы для разработки новых эффективных лигатурных сплавов для легирования и модифицирования промышленных алюминиевых сплавов тугоплавкими добавками.

Переходя к заключению, отметим, что в последние 15–20 лет в лаборатории были детально теоретически и экспериментально исследованы структурные состояния на разных стадиях фазовых превращений (старения, атомного упорядочения, мартенситных превращений) в разных метастабильных металлических сплавах и соединениях, в результате чего были разработаны фундаментальные научные принципы устойчивости и эволюции гетерофазных структур при легировании, термических и термомеханических обработках и их влияния на физико-механические свойства дисперсионно твердеющих, атомно-упорядочивающихся, испытывающих мартенситные превращения модельных и промышленных сплавов на основе алюминия, никеля, титана, благородных и тугоплавких металлов, железа. Сложившееся разделение труда позволяет проводить в лаборатории цветных сплавов многоплановые систематические комплексные исследования структурных и фазовых превращений и свойств разных материалов и в то

же время вести совместные работы в тесном сотрудничестве с коллективами институтов и предприятий разного направления: ИВТЭХ, ИМаш, ИМет, ИОС, ИХТТ, ИЭФ УрО РАН (г. Екатеринбург), Институт механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь), ФТИ УрО РАН (г. Ижевск), ИМет РАН, ИРЭ РАН (г. Москва), ИПСМ РАН (г. Уфа), ИФПМ СО РАН (г. Томск), УрФУ, УрГУ, УГПУ, УГМА (г. Екатеринбург), НИТУ «МИСИС» (г. Москва), СПбГУ (г. Санкт-Петербург), БГУ (г. Белгород), УГАТУ (г. Уфа), ТГУ (г. Томск), ФГУП ЦНИИ Чермет, ФГУП ВИАМ (г. Москва), ФГУП РФЯЦ-ВНИИТФ (г. Снежинск), ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров), ОАО «РЖД» (г. Москва), ОАО «ВМЗ» (г. Выкса), «Алтайвагон» (г. Барнаул), ООО «Микроакустика», ОАО «ОКБ Новатор», ОАО «Уралинтех» (г. Екатеринбург) и др.

Среди наиболее ярких прикладных разработок, внедрённых в последние годы в экономику России, необходимо отметить следующие. В области приоритетных прикладных исследований наибольший успех достигнут в разработке высокопрочных сплавов с эффектами памяти и создании нового поколения устройств, инструментов и аппаратов медицинского и технического назначения, не имеющих мировых аналогов. Развитие данного прорывного научно-технического направления привело к разработке вначале опытного, а затем серийного производства и широкомасштабному внедрению в экономике страны противопожарных датчиков-извещателей (в промышленности и жилищном комплексе), медицинских аппаратов серии «Захват» в пяти вариантах (используемых в широкой клинической практике для безопасного малоинвазивного эндоскопического и лапароскопического низведения камней из мочеточников и желчных протоков, для бужирования полых органов, эндоскопической электрохирургии добро- и злокачественных опухолей в урологии и гастроэнтерологии и разработанных совместно с ведущими врачами-урологами России).

Результаты данных исследований и научно-технологические разработки защищены патентами РФ, Великобритании, США, Канады, Европатентом в 32 странах, удостоены Диплома и премии В.Д. Садовского УрО РАН, 2-х Дипломов и премий В.Д. Садовского УрО РАН для молодых ученых, Диплома Президиума СО РАН, Диплома МАИК «Наука-Интерпериодика», Золотой медали и диплома 44 Всемирной выставки изобретений, исследований и промышленных инноваций в Бельгии в 1995 г. (Brussels EUREKA-95), медалей и дипломов Международной выставки Ленэкспо-2001, III Московского международного салона инноваций и инвестиций, ВВЦ-2003 и ряда других. Разработанные устройства и аппараты разрешены к применению и производству, были рекомендованы к серийному выпуску Министерством здравоохранения РФ. Они демонстрировались в КНР, ФРГ, Франции, Израиле, США, Бельгии, Польше, Австрии, Японии. Более 1000 отечественных аппаратов эффективно применяются в РФ и странах СНГ. В последние

10 лет разработанные медицинские приборы выпускаются международными компаниями «Cook Medical» и «Siemens» и применяются повсеместно. Более 15 лет в России ежегодно производится 1,5–2.0 млн противопожарных датчиков, которые устанавливаются в помещениях различного назначения. При внедрении разработок достигнут высокий экономический и социальный эффект.

В числе других существенных прикладных разработок, внедрённых в промышленность, можно отметить также отработку технологии производства твердых колёс повышенного качества для грузового железнодорожного транспорта России, выполненную совместно с лабораторией физического металловедения по заданию ОАО РЖД (г. Москва) в ОАО ВМЗ (г. Выкса). Были вскрыты основные механизмы структурно-фазовых превращений при изготовлении и эксплуатации железнодорожных колёс и их влияние на механические и усталостные характеристики. Научно-технологические рекомендации позволили оптимизировать химический состав, режимы выплавки и термомеханической обработки и обеспечить в ОАО ВМЗ массовый выпуск высококачественных железнодорожных колёс (до 1 млн штук в год, начиная с 2005 г.). Совместно с ООО «Микроакустика» были также разработаны научно-практические рекомендации по ликвидации брака и улучшению качества колёс высокоскоростных поездов «Сапсан».

По заданию ФГУП ВИАМ (г. Москва) в интересах ОАО «ОКБ Сухого» (г. Москва) и ОАО «Воронежского Акционерного самолётостроительного Общества» (г. Воронеж) была отработана технология получения высокопрочных алюминиевых сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu в едином производственном процессе изготовления элементов аэродинамических поверхностей заданной формы и кривизны для самолётов серии «SuperJet». Были выяснены ключевые закономерности эволюции структуры и структурные механизмы фазовых превращений в сплавах системы Al–Zn–Mg–Cu и установлены режимы механотермической обработки, обеспечивающие повышенную термическую стабильность их структуры, регламентированные уровни механических свойств, необходимую форму изделий требуемой геометрии.

Заметная часть научных и прикладных достижений обусловлена активным участием коллектива лаборатории в международных и российских научных проектах в рамках широкого научного сотрудничества (проекты INTAS, МНТЦ, РФФИ, ФЦП и др.). Было выполнено по 3 проекта INTAS, МНТЦ и ФЦП, а также 12 проектов РФФИ. В 2015–2017 г.г. действуют проект Российского научного фонда по теме «Создание высокопрочных и пластичных наноструктурированных сплавов с высокообратимыми эффектами памяти формы для термо-, электро- и магнитомеханических Smart-систем нового поколения» и международный проект ERA NET RUS_S&T совместно с Техническим университетом (г. Лодзь, Польша) и Институтом материаловедения Академии наук Слова-



Коллектив лаборатории цветных сплавов и отдела электронной микроскопии

кии (г. Кошице), в рамках которого ведутся исследования по созданию лёгких нанокристаллических материалов на основе алюминия с градиентным углеродным покрытием. Путём комплексной термомеханической обработки, включающей интенсивную пластическую деформацию, получены опытные образцы из наноструктурного сплава Al–Cu–Mg с высокими прочностными свойствами.

В последние 5–6 лет в лабораторию цветных сплавов и отдел электронной микроскопии пришли новые молодые сотрудники и аспиранты, теперь уже шестого поколения. Они прекрасно осваивают методы современных экспериментальных исследований, включая аналитическую электронную микроскопию, и увлечённо работают над актуальными проблемами фазовых и структурных превращений в новых перспективных материалах, в том числе в области наноматериалов и нанотехнологий. В 2015 г. была защищена кандидатская диссертация М.В. Ивченко, а в 2017 г. представлены к защите ещё две кандидатские диссертации Е.С. Белослудцевой и Д.Ю. Распосиенко.

Девиз лаборатории цветных сплавов и отдела электронной микроскопии «эстафету – молодым» позволяет молодым сотрудникам идти в ногу со временем и успешно решать новые фундаментальные и прикладные проблемы физического материаловедения. В настоящее время в коллективе из 27 человек 3 доктора наук, 10 кандидатов наук, 10 сотрудников имеют возраст до 35 лет, в том числе 8 аспирантов и соискателей учёной степени. Несмотря на небольшой стаж работы в лаборатории, каждый из молодых специалистов уже нашёл своё направление научной деятельности. Сотрудники лаборатории как всегда активно участвуют в работе международных и российских конференций, а результаты

своей научной деятельности регулярно публикуют в рецензируемых журналах и трудах конференций, коллективных монографиях.

В.Г. Пушин, И.Г. Бродова, Н.Н. Куранова

Список опубликованных монографий

1. Н.Н. Буйнов, Р.Р. Захарова, *Распад металлических пересыщенных твердых растворов*, Металлургия, Москва (1964), 143 с.
2. *Металловедение алюминия и его сплавов*, Справ. руководство, Под ред. Н.Н. Буйнова и др., Металлургия, Москва (1971), 352 с.
3. *Металловедение алюминия и его сплавов*, Справочник, Под ред. Н.Н. Буйнова и др., Металлургия, Москва (1983), 279 с.
4. Б.А. Гринберг, В.Г. Пушин, *Физика прочности и пластичности металлов и сплавов*, Изд-во УрГУ, Свердловск (1986), 195 с.
5. А.В. Добромыслов, Н.И. Талуц, *Структура циркония и его сплавов*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (1997), 228 с.
6. В.Н. Хачин, В.Г. Пушин, В.В. Кондратьев, *Никелид титана, структура и свойства*, Наука, Москва (1992), 108 с.
7. В.Г. Пушин, В.В. Кондратьев, В.Н. Хачин, *Предпереходные явления и мартенситные превращения*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (1998), 368 с.
8. В.Н. Журавлев, В.Г. Пушин, *Сплавы с термомеханической памятью и их применение в медицине*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2000), 148 с.
9. И.Г. Бродова, А.В. Добромыслов, Н.И. Носкова, В.В. Попов, В.Г. Пушин, В.В. Сагарадзе, Б.К. Соколов, Л.П. Тарабаев, В сб. *Новые перспективные материалы и новые технологии*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2001), 211 с.
10. *Сплавы никелида титана с памятью формы. Ч. I. Структура, фазовые превращения и свойства*, Под ред. В.Г. Пушина, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2006), 440 с.
11. В.Г. Пушин, в кн. *Физика металлов на Урале. История Института физики металлов в лицах*, РИО УрО РАН, Екатеринбург (2012), С. 389.
12. V.G. Pushin, N.N. Kuranova, E.B. Marchenkova, E.S. Belosludtseva, N.I. Kourov, T.E. Kuntsevich, A.V. Pushin, A.N. Uksusnikov, in *Shape Memory Alloys: Properties, Technologies, Opportunities*, ed. by N. Resnina and V. Rubanik, Trans Tech Publ., (2015), P.1074.
13. Р.З. Валиев, Д.В. Гундеров, Н.Н. Куранова, В.Г. Пушин, А.Н. Уксусников, в сб. *Инновационные металлические материалы*, Под ред. В.М. Колокольцева, Изд-во Магнитогор. гос.ун-та, Магнитогорск, (2016), С.10.
14. Д.В. Гундеров, Р.З. Валиев, Г.И. Рааб, А.Г. Попов, В.Г. Пушин, В.В. Кондратьев, *Трансформация структуры и физико-механических свойств кристаллических и аморфных сплавов систем Nd(Pr)-Fe-B и Ti-Ni при воздействии интенсивной пластической деформации*, Гилем, Уфа (2016), 280 с.
15. *Перспективные материалы и технологии*, Под ред. В.В. Клубовича, УО ВГУ, Витебск (2017), Т. 1, 465 с.

ОТДЕЛ наноспинтроники

ЛАБОРАТОРИЯ

диффузии

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Попов Владимир Владимирович, заведующий лабораторией, д.т.н., профессор
- Блинов Илья Викторович, научный сотрудник
- Горбачев Игорь Игоревич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Дрокина Анна Александровна, главный специалист
- Истомина Анастасия Юрьевна, младший научный сотрудник
- Мамаева Любовь Ивановна, ведущий технолог
- Матвеев Сергей Анатольевич, главный специалист
- Матынова Татьяна Альфисовна, инженер
- Пасынков Александр Юрьевич, младший научный сотрудник
- Слепак Борис Соломонович, главный специалист
- Степанов Константин Адольфович, главный специалист
- Столбовский Алексей Владимирович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Ступак Максим Евгеньевич, инженер
- Фалахутдинов Руслан Мавлетханович, инженер-исследователь
- Чупраков Станислав Александрович, младший научный сотрудник

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ ДИФФУЗИИ

Диффузионные исследования проводились в Уральском физико-техническом институте (первое название Института физики металлов) с самого начала его образования в 1932 г. Отдел изучения диффузии во главе с Виктором Соломоновичем Бугаковым создан в соответствии с приказом № 2 по УФТИ. В составе отдела было 6 сотрудников. В 1936 г. в связи с окончательным переездом института в Свердловск сформирована структура института. 28 ноября 1936 г. в соответствии с приказом № 154 по УФТИ, изданном на основании приказа № 34 по НИС Наркомтяжмаша СССР от 14 ноября 1936 г., утверждена структура института, и в числе первых 11 лабораторий была создана лаборатория диффузии, её возглавил В.С. Бугаков, который ещё по работе в Ленинградском физико-техническом институте был хорошо знаком с Владимиром Ивановичем Архаровым, они регулярно обменивались письмами (В.И. Архаров с 1934 по 1937 гг. работал в Горьковском исследовательском физико-техническом институте). В своем письме В.И. Архарову, которого он приглашал на работу, Виктор Соломонович писал, что «в отделе диффузии выкристаллизовались совершенно чётко два направления, которые я думаю развивать дальше.

1. Изучение подвижности атомов в решётке в наиболее чистом виде.

2. Природа и механизм возникновения новых фаз в процессе сложной диффузии.

Первое направление имеет своей конечной целью максимально близко подойти к вопросу о механизме подвижно-



Основатель и первый заведующий лабораторий диффузии Виктор Соломонович Бугаков

сти атома в решётке и к построению математической (не модельной) теории этого явления.

На 1937 год намечается тема «Изучение *Salbst*-диффузии* металлов с помощью искусственной радиоактивности».

По руководством В.С. Бугакова впервые в мире были измерены коэффициенты самодиффузии свинца с использованием радиоактивных изотопов. Бугаковым с сотрудниками выполнены пионерские исследования взаимной диффузии в металлах, изучено влияние размера зерна на протекание диффузионных процессов, исследована анизотропия диффузии и т.п. В 1937 г. Бугаковым совместно с Нескучаевым была опубликована одна из первых, если не первая, монография по диффузии в металлах [1]. В январе 1941 г. после защиты докторской диссертации В.С. Бугаков вернулся в Ленинград. Там он скончался во время блокады. В 1947 г. была опубликована монография «Диффузия в металлах и сплавах», которая представляет собой обобщение проведённых В.С. Бугаковым и его сотрудниками исследований наиболее существенных и общих вопросов диффузии металлов [2]. В основу монографии положена докторская диссертация В.С. Бугакова.

В 1937 г. в лабораторию диффузии поступает на работу Владимир Иванович Архаров. Он проводит исследования по тем научным направлениям, которые они наметили совместно с В.С. Бугаковым. В 1938 г. ему без защиты диссертации (по совокупности опубликованных работ) присвоена ученая степень кандидата технических наук. С января 1941 г. после отъезда В.С. Бугакова в Ленинград В.И. Архаров назначается заведующим лабораторией диффузии, где развивались как направления, намеченные В.С. Бугаковым, так и те направления, которые В.И. Архаров на-

чал развивать раньше в процессе предыдущей работы в Ленинграде и Горьком.

Общее направление работ В.И. Архарова и лаборатории диффузии в этот период – исследование структурных изменений в твёрдых телах в связи с явлениями диффузии. В основном изучались явления реакционной диффузии (особенно процессы высокотемпературного окисления металлов и газового хромирования), а также явления, связанные с диффузией при термической обработке сталей и сплавов (особенно процессы внутренней адсорбции в поликристаллических сплавах и выпадения карбидов при отпуске сталей, явления перегрева стали). В связи с проблемами термообработки сталей выполнены исследования механизма фазовых превращений, в частности, старения сплавов и мартенситного превращения.

Важнейшим направлением исследований лаборатории было изучение механизма высокотемпературного окисления железа, стали и некоторых других ме-

таллов. В этих исследованиях принимали участие З.П. Кичигина, М.И. Симонова, И.П. Поликарпова, С. Мардешев. Они развивались в направлении выяснения структурных характеристик окалины в случаях её защитного действия и, наоборот, в случае усиленной окисляемости металлов и сплавов. Исследовались: фазовый состав окалины, параметры кристаллических решёток оксидных фаз и градиенты параметров по толщине окалины, размеры зёрен и искажения решётки в разных слоях окалины, а также текстура окалины. Эти структурные характеристики увязывались с кинетикой окисления и по этим данным выяснялась относительная роль диффузии кислорода сквозь окалину вглубь (к ещё не окисленному металлу) и диффузия металлов изнутри на наружную поверхность окалины. Прослеживалось изменение этого соотношения с температурой. Было изучено окисление железа, низколегированных сталей, меди, хрома, марганца, кобальта, никеля, титана, алюминия, скандия. В этих работах установлена связь структуры окалины и скорости окисления металла. На основе анализа богатейшего экспериментального материала В.И. Архаровым была построена структурная теория процесса высокотемпературного окисления металлов и сформулированы основные принципы жаростойкости и защитного действия оксидных плёнок, влияния разных легирующих элементов в сплаве на структурный тип окалины. Это направление работ В.И. Архарова имеет очень важное значение для современной техники в связи с необходимостью создания высококачественных сплавов, работающих в условиях высоких температур и в агрессивных средах. Исследования позволили решить ряд практических задач по оптимизации технологии обработки металлов, связанных с их окислением.

На основе этих работ В.И. Архаровым была написана и защищена докторская диссертация на тему «Структурная теория высокотемпературного окисления железа, стали и некоторых других металлов», а основные научные результаты обобщены в монографии «Окисление металлов при высоких температурах» (1945 г.) [3]. Признанием значимости результатов в вопросах окисления металлов является то, что В.И. Архаров с 1969 г. (начало выпуска журнала) до конца своих дней был членом редколлегии журнала «Oxidation of Metals» (издаваемого в Нью-Йорке, США).

Наряду с высокотемпературным окислением металлов также изучались родственные этому процессу явления взаимодействия металлов с газовыми средами – азотирующими, карбидизирующими и другими. Особенно детально были разработаны вопросы газового хромирования как в плане теоретического рассмотрения процесса, так и в отношении физико-химических и механических свойств металлопокрытий, получающихся при этом процессе, и возможности его практической реализации. Результаты исследований изложены в монографии «Газовое хромирование» (1945 г.) [4].



Владимир Иванович Архаров – заведующий лабораторией диффузии в 1941–1966 гг.

В годы Великой Отечественной войны В.И. Архаров использовал на Уралмашзаводе идею о возможности управления свойствами конструкционных материалов путем их диффузионного легирования малыми количествами примесей, сегрегирующих на границах зерен. Это направление на долгие годы стало важнейшим для лаборатории диффузии. На основании исследований были разработаны методика и технология газового хромирования стальных изделий, которые позволили решить проблему выбора материалов для производства важного оборонного изделия, наладить его серийное изготовление. За эту работу В.И. Архаров был награжден орденом Красной Звезды и медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941 – 1945 гг.».

Следующей важной темой стала карбидизация электролитических осадков хрома, дающая исключительно высокую химическую и механическую стойкость защитного слоя. В.И. Архаровым совместно с его учеником – С.А. Немноновым развиты теоретические представления о физической природе твердости электролитического хрома.

Исследованы явления реакционной диффузии при воздействии на металл разнообразных химически активных газовых сред: паров серы, селена, теллура, галогенидов, кремния, фосфора и др.

Важнейшее направление работ лаборатории во время заведования В.И. Архарова – это исследования по теоретическому обоснованию и экспериментальному изучению явления межкристаллитной внутренней адсорбции растворенных компонентов и примесей в поликристаллических твердых телах. Одним из научных направлений в лаборатории было изучение закономерностей межкристаллитной внутренней адсорбции в металлах методом внутреннего трения (А.И. Моисеев). В.И. Архаров разрабатывает впервые выдвинутую им еще в 1945 г. идею о возможности внутренней адсорбции в твердых телах, «приводящей к тому, что в равновесном состоянии, достигаемом при выдержках при высоких температурах, может наблюдаться обогащение структурных неоднородностей (например, границ зёрен и субзёрен) различными примесями». Эти работы стали логическим развитием практических исследований по перегреву стали и выяснению природы камневидного излома, которые выполнялись им в порядке сотрудничества с лабораториями Уралмашзавода во время войны и после её окончания. На основе полученных данных о внутренней адсорбции В.И. Архаров сформулировал общий подход, позволивший с единой научной точки зрения объяснить большой круг разнообразных явлений в сплавах. К ним относятся перегрев и отпускная хрупкость сталей, связанные с диффузией растворенных компонентов при термической обработке, закономерности прокаливаемости и модифицирования сплавов, интеркристаллитная коррозия и действие стабилизаторов, модифицирование процес-

сов старения. Это позволило разработать эффективные способы управления структурой и свойствами металлических материалов, а также целенаправленно влиять на некоторые специальные свойства сталей, чему посвящён целый ряд работ, давших важный результат, используемый для построения теории этих специальных свойств.

В области изучения фазовых превращений В.И. Архаров построил структурную картину процесса газовой коррозии и рассмотрел общие кристаллографические аспекты структурных перестроек при фазовых превращениях в сплавах. Он классифицировал фазовые превращения по механизму элементарного акта и уточнил механизм бездиффузионных превращений. В частности подробно смоделирован механизм перестройки решётки при мартенситном превращении в стали, рассчитаны некоторые кристаллогеометрические соотношения, регулирующие процесс этой перестройки, его кинетику. Результаты этих исследований изложены в монографии «Кристаллография закалки стали» (1951 г.) [5].

В ходе проводимых исследований было выполнено большое количество методических работ, посвящённых усовершенствованию рентгеноструктурного анализа, различным его практическим применениям, ряду других металловедческих методических вопросов.

В своих воспоминаниях С.М. Клоцман пишет, что В.И. Архаров был настоящим учителем, который всячески поддерживал своих учеников, но считал, что научная самостоятельность – залог успешного развития молодых учёных. Поэтому после защиты С.М. Клоцманом кандидатской диссертации В.И. Архаровым предпринял усилия по выделению группы, занимавшейся работами с использованием радиоактивных изотопов в самостоятельное подразделение. В 1964 г. постановлением учёного совета ИФМ в составе лаборатории диффузии была создана группа диффузии радиоактивных индикаторов во главе с С.М. Клоцманом, в которую вошли ученики В.И. Архарова: А.Н. Тимофеев, И.П. Поликарпова, Н.К. Архипова, В.Н. Кайгородов и др. В этой группе в лаборатории диффузии стали проводиться количественные исследования диффузионных явлений в твердых телах с помощью радиоактивных изотопов.

В 1947 г. В.И. Архаровым в Уральском государственном университете имени А.М. Горького была организована кафедра физики твердого тела. Многие исследования проводились на кафедре или во взаимодействии кафедры и лаборатории диффузии, где выполнялись курсовые и дипломные работы студентов кафедры. То обстоятельство, что В.И. Архаров руководил и лабораторией, и кафедрой, способствовало пополнению лаборатории диффузии выпускниками кафедры физики твердого тела: С.М. Клоцман, И.П. Поликарпова, Е.В. Агапова, И.Ш. Трахтенберг, Н.К. Архипова, В.Н. Кайгородов и др.

Успешная научная и учебно-воспитательная деятельность В.И. Архарова в стенах Уральского университета и Института физики металлов была отмечена награждением его орденом «Знак почёта» (1954 г.).

В 1965 г. В.И. Архаров был избран действительным членом академии наук Украины и в 1966 г. перешёл на работу в Донецкий физико-технический институт АН Украины, где возглавил сектор металлургической физики, включающий несколько отделов. После отъезда В.И. Архарова в Донецк он во время визитов в ИФМ живо интересовался жизнью лаборатории диффузии, её научными достижениями и перспективами развития.

После отъезда академика В.И. Архарова в созданный на Украине Донецкий Научный Центр, в марте 1966 г. директором Института профессором М.Н. Михеевым, по согласованию с В.И. Архаровым, который до 1967 г. оставался научным консультантом лаборатории, заведующим лабораторией диффузии был назначен один из его учеников – Владимир Олегович Есин.

В этот период в лаборатории диффузии выполнялись исследования по трём основным направлениям. Первое касалось исследования физического механизма реакционной диффузии, его возглавлял научный консультант лаборатории В.И. Архаров. В рамках этого научного направления были выполнены исследования кристаллохимического механизма перестройки решётки при фазовых превращениях и химических реакциях в твёрдом состоянии вещества (З.П. Кичигина, Е.В. Агапова) и исследования кинетики реакционной диффузии в системах, содержащих сверхпроводящие фазы (А.И. Моисеев, Т.А. Угольникова).

Второе научное направление, которое возглавил новый заведующий В.О. Есин, развивалось совместно с группой вычислительной математики, лабораториями низких температур и высоких давлений. В рамках этого научного направления разработана микроскопическая модель строения межфазной границы кристалл-изотропная фаза, выполнены исследования кристаллографических особенностей перемещения межфазной границы, проведены рентгенографические исследования структуры монокристаллов никеля и гадолиния, изучено влияние дисперсных включений, полученных в результате внутреннего окисления, на механические свойства сплавов системы никель-алюминий.

Третье направление (руководитель А.И. Моисеев) касалось разработки физических основ получения проволок со сверхпроводящим слоем.

После отъезда В.И. Архарова группа диффузии радиоактивных индикаторов фактически становится самостоятельным подразделением. Сотрудники этой группы занимались исследованием закономерностей диффу-



Владимир Олегович Есин – заведующий лабораторией диффузии в 1966–1969 гг.



Лаборатория диффузии со своим научным консультантом, 1967 г.
Слева направо. Сидят: Т.А. Угольникова, М.И. Симонова, З.П. Кичигина, В.И. Архаров, Е.В. Агапова, А.И. Моисеев, В.О. Есин, Стоят: Т.Г. Федорова, А.С. Кривоносова, А.Ф. Чулкова, И.Л. Яковлева, В.Ф. Кресак, Ю.С. Меньшиков, Е.Д. Востриков, Б.И. Гуревич, В.М. Федоров, М.С. Костромитина, В.Г. Кухарчук

зии в различных материалах с помощью разного типа изотопов. В составе группы было несколько очень талантливых человек, многие из которых стали впоследствии ведущими сотрудниками лаборатории диффузии. Прежде всего нужно выделить Андрея Николаевича Тимофеева, сына известного учёного-генетика Тимофеева-Ресовского, знаменитого Зубра. Воспитанный в Европе, А.Н. Тимофеев был утончённым, воспитанным, исключительно интеллигентным человеком, прекрасно владел французским и немецким языками. Тимофеев являлся прирождённым экспериментатором. Вторым по значимости в группе был Илья Шмулевич Трахтенберг, который обладал острым умом, совершенной логикой в выражении мыслей и идей. Трахтенберг был очень талантливым и разносторонним человеком, замечательным пародистом и в течение многих лет в институте под его руководством ставились оперы на темы институтской жизни. Впоследствии он возглавил выделенную из лаборатории диффузии лабораторию тонких плёнок и покрытий. Нужно также отметить Владимира Николаевича Кайгородова, первого аспиранта С.М. Клоцмана. Он был очень трудолюбивый и усидчивый сотрудник, допоздна задерживался в лаборатории, поскольку анализ диффузионных слоёв требовал длительного времени счёта радиоактивности особенно в тех слоях, где небольшая концентрация изотопа. В 1970 г. он защитил кандидатскую диссертацию, объём которой превышал многие докторские диссертации – 293 стр. Впоследствии В.Н. Кайгородов возглавил мессбауэровские исследования в лаборатории. В 1967 г. в группу пришел С.А. Матвеев, внёсший исключитель-



Семен Моисеевич Клоцман –
заведующий лабораторией
диффузии в 1969–2001 гг.

ный вклад в создание современной материальной базы лаборатории диффузии. В состав группы также входили И.П. Поликарпова, Я.А. Рабовский, В.К. Талинский, А.Б. Владимиров, Н.К. Архипова, А.В. Орехов.

В группе поддерживалась жёсткая дисциплина. Работа начиналась точно в восемь тридцать утра. Обед был строго по графику. Несмотря на сокращённый рабочий день, никто раньше семи вечера с работы не уходил. Частенько задерживались до более позднего времени, приходили и в выходные дни. Диффузионные отжиги шли круглосуточно. По вторникам в пятнадцать тридцать проводились еженедельные лабораторные семинары, на которых докладывались научные работы сотрудников, осуществлялось реферирование статей, опубликованных в ведущих зарубежных журналах. По пятницам был еженедельный отчёт сотрудников о проделанной за неделю работе, полученных результатах и планах на предстоящую неделю.

Приказом директора института от 19 ноября 1969 г. лаборатория излучений была объединена с группой диффузии радиоактивных индикаторов и переименована в лабораторию диффузии. Прежняя лаборатория диффузии была переименована в лабораторию кристаллизации. Во главе вновь созданной лаборатории диффузии становится Семен Моисеевич Клоцман, который незадолго до этого защитил докторскую диссертацию.

Количество сотрудников увеличилось до 30 человек, хотя часть бывших сотрудников лаборатории излучений уволились или уехали в Ижевск в создаваемый Физико-технический институт. В результате такой реорганизации лаборатория диффузии получила богатую материальную базу: в лабораторию перешли корпус ускорителей, помещения бывшего бетатрона в третьем корпусе, линейный ускоритель электронов ЛУЭ-25, а также появились токарный и фрезерный станки и аргонодуговая сварка. Кроме того, лаборатория приобрела ценных технических сотрудников, таких как А.А. Слободчиков, Е. Переус, Г. Горелых, которые ещё долго и плодотворно работали на нужды диффузионной «части» лаборатории.

В лаборатории диффузии сохранились порядки группы радиоактивных индикаторов: сотрудники трудились, не считаясь со временем, и каждую неделю отчитывались о своей работе, а также регулярно проводились семинары. Начали проводиться ежегодные выездные семинары в Чердынцево.

Первоначально в лаборатории диффузии было два основных направления исследований. Первое – исследование диффузии радиоактивных индикаторов в металлах, оксидах и солях, второе – радиационные дефекты в металлах.

Направление, связанное с диффузией радиоактивных индикаторов, было традиционным для С.М. Клоцмана и развивалось пер-

воначально в группе радиоактивных индикаторов. Основными сотрудниками, работавшими над этой темой, были А.Н. Тимофеев, И.П. Поликарпова, И.Ш. Трахтенберг, Н.К. Архипова, А.Б. Владимиров, В.Н. Кайгородов. В то время был мировой бум в прецизионных диффузионных исследованиях, основанных на использовании радиоактивных индикаторов. Считалось, что высокая точность измерения диффузионных параметров даёт информацию о дефектной структуре кристаллов. Лаборатория диффузии взаимодействовала с несколькими зарубежными центрами, в которых также проводились прецизионные диффузионные измерения. Среди них можно отметить Арагонскую национальную лабораторию, в частности, С. Розмана.

В то время в лаборатории доминировали исследования, связанные с теорией Лазурса-ЛеКлера. Теория строилась для благородных металлов, и изучалась зависимость энергии активации диффузии от номера элемента атома примеси в периодической системе. Эта работа потребовала очень высокой точности измерения коэффициентов диффузии. Были разработаны различные методики послойного анализа, включая снятие слоёв на токарных станках и анодное окисление, методики регистрации продуктов радиоактивного распада.

Особенно нужно отметить работы по диффузии в тугоплавких материалах, в частности, в вольфраме. Тут имелись несомненные достижения в экспериментальной технике. Было приобретено или создано оборудование для проведения отжигов при температурах до 3000 °С в безмасляном вакууме, освоен пирометриче-



Участники выездного семинара лаборатории диффузии в Чердынцево.
Слева направо: С.М. Клоцман, И.П. Поликарпова, Н.К. Архипова, Я.А. Рабовский,
стажер из Бурятии, В.К. Талицкий, В.Н. Кайгородов, А.Н. Тимофеев



А.Н. Тимофеев проводит измерения на гамма-спектрометре

ский метод измерения температуры. Для предотвращения испарения радиоизотопов с образцов последние помещались в контейнеры из тугоплавких металлов, заваренные в вакууме. Существующее производство радиоизотопов не могло обеспечить дешёвое и быстрое изготовление диффузانتов. Было организовано их получение на реакторе Белоярской атомной электростанции и освоена вся технология облучения. В этих работах и создании материальной базы для них основное участие принимали А.Н. Тимофеев, Н.К. Архипова, С.А. Матвеев, Я.А. Рабовский, В.К. Талинский.

В целом эти исследования создали С.М. Клоцману и ведущим сотрудникам лаборатории высокую репутацию в научном мире. Это нашло отражение в том, что С.М. Клоцман в 1982 – 2000 гг. включается в состав международных консультативных комитетов большинства Международных конференций по диффузии.

На основе появившегося в лаборатории диффузии ускорителя электронов ЛУЭ-25 С.М. Клоцман основал новое направление исследований – радиационно-индуцированные структурно-фазовые изменения в металлах и сплавах. На начальном этапе информация о структурном состоянии образцов получалась с помощью измерений остаточного электросопротивления при температуре жидкого гелия. Достигнуты очень высокая чувствительность в измерении остаточного сопротивления 5×10^{-10} Ом·см и точность



Участники международной конференции DIMAT 96, г. Мюнстер, Германия. Слева направо: А.Н. Тимофеев, С.М. Клоцман, Р.Ш. Малкович, З. Хехенкамп, В.Б. Выходец, Л.С. Швиндлерман

до 0,005 %. Было создано несколько установок для облучения образцов, в том числе проточный гелиевый криостат для облучения при гелиевых температурах и установки для высокотемпературного облучения (до 600 °С), а также установки для отжига образцов в сверхвысоком вакууме при температурах до 1500 °С. Из научных результатов надо отметить исследования субструктуры III стадии отжига в чистых ПЦК металлах: Cu, Ag, Au, а также радиационно-индуцированных процессов в сплавах Fe–Cr, Fe–Ni, Fe–Cr–Ni, нержавеющей сталях и ванадиевых сплавах, корпусных реакторных сталях и удобных для исследования аналогах – прецизионных чистых металлах и модельных сплавах. Исследуемые вопросы относятся к фундаментальной проблеме физики конденсированного состояния – поведения многокомпонентных сплавов и соединений в неравновесных условиях при облучении, деформации и термообработках. Так получилось, что это направление оказалось идейно связанным с диффузионной тематикой. Работы по тематике радиационных дефектов возглавлял В.Л. Арбузов, из других сотрудников надо отметить С.Е. Данилова, А.Э. Давлетшина, А.П. Дружкова, А.Л. Николаева. По мере развития этого направления появились новые методики для получения информации о состоянии образцов. Это были измерения угловой корреляции аннигиляционного излучения, туннельная сканирующая микроскопия, исследование механических свойств облучённых металлов и сплавов (испытание на разрыв, измерение КТР).

В середине 70-х годов в лаборатории диффузии возникло научное направление, связанное с ускорителем лёгких ионов – ускорителем Ван-де-Граафа. Методика радиоактивных индикаторов была не эффективна для измерения концентраций изотопов лёгких элементов, т.к. радиоактивные изотопы с подходящими для диффузионных измерений характеристиками есть только у немногих лёгких элементов, например, ^{14}C и тритий. В то же время к началу 70-х годов прошлого века уже появились первые работы по диффузии кислорода в металлах, выполненные с помощью методики ядерного микроанализа, в английской транскрипции она получила название nuclear reaction analysis (NRA). В этих исследованиях использовалось так называемое явление мгновенной радиоактивности, которое происходит при облучении образцов высокоэнергетическими протонами, дейтронами или изотопами гелия. С помощью методики NRA можно было перенести идеологию методики радиоактивных индикаторов на исследования диффузии лёг-

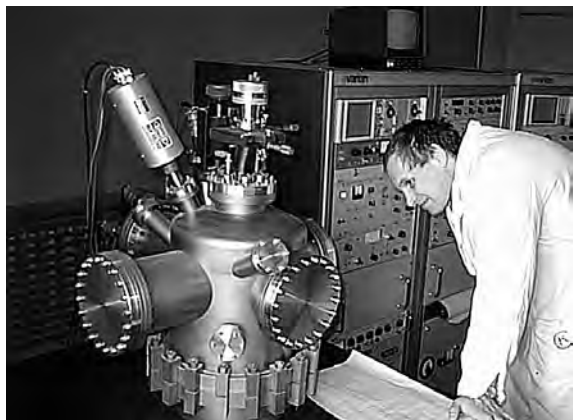


Н.К. Архипова, измеряет температуру в высокотемпературной вакуумной печи с помощью пирометра

ких элементов в твёрдых телах. Для этого требовался ускоритель, и он был приобретен институтом в 1975 г. Группу, работающую на пучке ускорителя, с самого начала возглавлял В.Б. Выходец. Из его коллег, сыгравших ключевую роль в становлении и развитии ускорительной методики в ИФМ, нужно отметить В.А. Павлова, А.Д. Левина, В.В. Степанова, Н.С. Саканцева, И.К. Голубкова и Т.Е. Куренных. Ими был получен ряд важных научных результатов. Например, при исследовании диффузии кислорода в альфа-титане достигнута точность определения коэффициентов диффузии в несколько процентов, а в энергии активации диффузии – 0,5 %. Это была примерно такая же точность измерений, как и при использовании радиоактивных индикаторов. Дальнейшее развитие этого направления происходило уже не в лаборатории диффузии, но его основы заложены С.М. Клоцманом, когда он был заведующим лабораторией диффузии.

Примерно в 1980 г. в ленинградском НПО «Светлана» возникла необходимость создания катодов для сильноточной электроники. Эту задачу на предприятии решить не смогли, и об этом через академика С.В. Вонсовского стало известно С.М. Клоцману, который взялся за оперативное решение проблемы при условии, что будет выделена валюта для приобретения импортного научного оборудования. В решении этой задачи принимали участие многие сотрудники лаборатории. Особо следует отметить И.Ш. Трахтенберга, А.Н. Тимофеева, С.А. Матвеева, В.Н. Кайгородова, С.А. Плотникова, которые разработали катоды на основе вольфрама и лантана с рабочей температурой выше 1000 °С. Работы велись в круглосуточном режиме при постоянном дежурстве.

Катоды создавались с помощью напылительной техники, и здесь очень помог опыт в использовании напылительной технологии при создании диффузионных источников. Для этих работ был спроектирован и изготовлен цилиндрический магнетрон на базе



К.А. Степанов за работой на Оже-спектрометре фирмы «Varian»

турбонасоса. Установка демонстрировалась на ВДНХ, и в 1983 г. удостоена диплома ВДНХ, а авторы Клоцман, Трахтенберг и Матвеев – медалей ВДНХ. Было изготовлено четыре цилиндрических магнетрона для разных целей разной мощности, один из них продан ОИЯИ. На вольфрамовые керны катодов проводилось напыление эмиссионных материалов разными способами, с последующим отжигом для обеспечения адгезии. Для длительных испытаний катодов создали сверхвысоковакуумные стелды. Групповое испытание времени жизни проводилось на реальных мо-

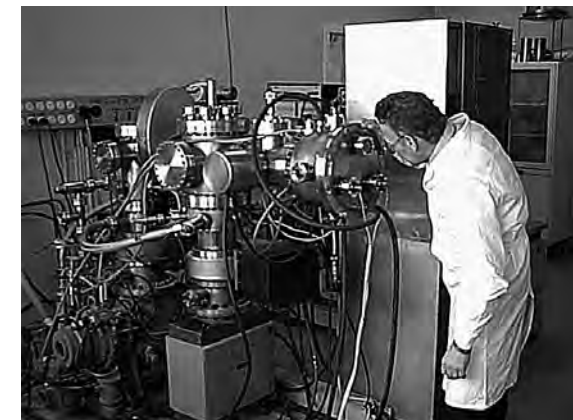
делях ламп. Всё это было оперативно внедрено на «Светлане». На полученную валюту и приобретены ВИМС «САМЕСА», комплекс сверхвысоковакуумного оборудования «Varian» и многое другое. В 1980 г. был запущен комплекс оборудования «Varian», немного позднее – ВИМС «САМЕСА». Установка электронно-лучевого напыления «Varian» и Оже-спектрометр «Varian» сразу начали выполнять работы со «Светланой» (Матвеев, Степанов, Бакунин, Данилов и др.). ВИМС к решению поставленных задач не был подготовлен. Сразу начались доделки, потом переделки, перешедшие в постоянный ремонт, чем упорно занимались С.А. Матвеев и Б.С. Слепак. Тем не менее, впоследствии на нём удалось провести ряд исследований.

В 1984 г. исполнители работ со «Светланой» выдвигались на Государственную премию СССР.

Побочным результатом этой деятельности явилось увлечение напылительными технологиями, работами по созданию различных источников для напыления. В результате среди прочего был создан источник, с помощью которого получены алмазоподобные плёнки с использованием деструкции углеводородов. Эти плёнки сразу нашли применение на оптико-механическом заводе для защиты оптики. По договору с оптико-механическим заводом отрабатывались режимы получения просветлённой оптики для мощных лазеров. Для ускорения работ была взята сначала в аренду, передана и запущена в работу установка электронно-лучевого напыления «Perkin-Elmer». Напыления проводились на ней и на установке «Varian». Качество напыления определялось стехиометрическим составом плёнок по кислороду, этим занималась группа В.Б. Выходца на протонном ускорителе. Попутно для ОМЗ велись и ряд другие работы по лазерной тематике.

Поскольку спектр применения алмазоподобных плёнок ожидался широким, С.М. Клоцман стал развивать это направление, и плёнки стали получать также распылением графита. Для этой цели купили промышленную специализированную установку. В результате родилась лаборатория физики плёнок и покрытий под руководством И.Ш. Трахтенберга.

Была создана установка для напыления ферромагнитных материалов (С.А. Матвеев). Электронно-лучевое напыление таких материалов из сплавов затруднено из-за нарушения состава, а магнетронное напыление требует непростой конфигурации магнитной системы. Спроектировали и изготовили сначала специальный магнетрон с параллельным сопро-



С.А. Матвеев за работой на магнетроне собственной конструкции

вождением, а затем и установку для комплексного магнетронного напыления. Такой магнетрон не только позволял распылять ферромагнитные металлы и сплавы, но и за счёт многократного повторного напыления получать плёнки, по составу идеально совпадающие с составом мишени. Были получены плёнки на основе сплавов кобальта для длительной записи информации по принципу «одно зерно – один домен» с размером зерна до 10 нм. Аналогичная установка ионно-плазменного напыления изготовлена по заказу института общей физики АН СССР.

В середине 80-х годов лаборатория диффузии успешно включилась в работы по ВТСП. Послойным напылением слоёв иттрия, бария и меди с последующим отжигом в кислороде были получены первые плёнки в институте. Состав плёнок исследовался на ВИМС, структура – на Оже-спектрометре, а свойства – группой Арбузова. Особо изучался процесс деградации ВТСП-свойств плёнок и создание барьерных слоёв плёнка–подложка. Были завязаны связи с университетом в г. Йена, ГДР.

Ещё одно направление, основанное С.М. Клоцманом, было связано с позитронной аннигиляционной спектроскопией (ПАС). Наиболее активно ПАС используется для изучения дефектов вакансионного типа (вакансий, вакансионных кластеров, нанопор, петель вакансионного типа). В бездефектном материале позитрон отталкивается положительно заряженными ядрами атомов. Вакансии (и их скопления), благодаря отсутствию отталкивающего ядра, являются потенциальной ямой для позитрона, поэтому позитрон захватывается и аннигилирует в них. При этом увеличивается время жизни позитронов и происходит сужение импульсного распределения аннигиляционного излучения. Величина соответствующих изменений определяется напрямую размером и концентрацией вакансионных дефектов. В 1977 г. был заключён договор с Союзным НИИ приборостроения Минсредмаша на разработку установок для наблюдения параметров позитронной аннигиляции. В 1979 г. СНИИП поставил автоматизированный спектрометр угловой корреляции аннигиляционного излучения (УКАИ) с угловым разрешением 0,5 мрад и спектрометр времени жизни позитронов, изготовленный коллективом МИФИ, как соисполнителей договора. Пуско-наладочные работы на спектрометре начались в 1982 г. с приходом в лабораторию А.П. Дружкова. На спектрометре были проведены исследования накопления радиационных дефектов при электронном облучении, их взаимодействие между собой и с атомами примесей, а также изучена кинетика отжига точечных дефектов и их скоплений в никеле и разбавленных сплавах на его основе.

Несмотря на проблемы с эксплуатацией ВИМС «САМЕСА», с использованием этого оборудования был выполнен значительный объём исследований объёмной диффузии (А.Н. Тимофеев, Г.Н. Татарникова, С.В. Осетров).

В 1975–1980 гг. В.Н. Кайгородовым были созданы материальные условия для использования эффекта Мессбауэра при исследовании структуры и свойств внутренних поверхностей раздела. Приобретены два мессбауэровских спектрометра ЯГРС-4, работающих в режиме постоянных скоростей. Освоена методика приготовления образцов-источников для проведения мессбауэровских исследований. На этой основе был разработан новый метод исследования структуры и свойств внутренних поверхностей раздела и приграничных областей кристаллической решётки.

В 80-х годах в лаборатории диффузии значительно расширился парк научного оборудования как промышленного (импортного и советского), так и собственного изготовления. В его проектировании, изготовлении, наладке и ремонте принимали активное участие А.А. Слободчиков, С.А. Матвеев, Б.С. Слепак, А.М. Прохоров, Н.И. Романов, Акимов и другие.

В этот период лабораторию диффузии неоднократно посетил В.И. Архаров, который продолжал интересоваться проводимыми работами.

К концу 80-х годов в штате лаборатории было почти 80 сотрудников, и в 1987 г. на базе лаборатории диффузии был создан отдел диффузионных явлений в составе четырёх лабораторий. Отдел возглавил С.М. Клоцман. В его состав вошли три лаборатории, образованные из лаборатории диффузии: лаборатория диффузии (заведующий С.М. Клоцман), лаборатория плёнок и покрытий (заведующий И.Ш. Трахтенберг), лаборатория радиационных дефектов (заведующий В.Л. Арбузов) и лаборатория электронной спектроскопии (заведующий О.Б. Соколов). На первом этапе лаборатории тесно взаимодействовали друг с другом. Окончательно раздел имущества прошёл только в 1995 г.

В качестве одного из выдающихся достижений лаборатории диффузии, а точнее уже отдела диффузионных явлений, была организация в 1991 г. масштабной международной конференции Diffusion and Defects in Solids, которая проходила с 26 июня по 4 июля 1991 г. (председатель оргкомитета – С.М. Клоцман, секретарь – В.Б. Выходец). Это, по-видимому, единственная в советской истории диффузионная конференция такого масштаба на теплом по маршруту Москва – Пермь. В ней приняли участие учёные более 20 стран. Организаторам удалось собрать практически весь цвет диффузионного сообщества. В ней приняли участие Ч. Херциг, В. Густ, Г. Мерер, (Германия), Д. Гупта, С. Розман



В.Н. Кайгородов за работой на мессбауэровском спектрометре ЯГРС-4М



Визит В.И. Архарова в лабораторию диффузии ИФМ.
Слева направо В.И. Архаров, И.Ш. Трахтенберг, И.П. Поликарпова, В.И. Архаров,
А.Н. Тимофеев, А.И.Моисеев, С.М. Клоцман

(США), Ле Клер, П. Гас (Франция), Г. Фогль (Австрия), Д. Беке (Венгрия), Ж. Кучера (Чехословакия), М. Данилевский (Польша), К.Н. Ту (Великобритания), Б.С. Бокштейн, Л.С. Швиндлерман, Г.В. Щербединский, В.Л. Инденбом, А.П. Мокров (СССР) и другие выдающиеся учёные. Конференция прошла исключительно успешно, и участники до сих пор с большой теплотой вспоминают её. К сожалению, это были последние месяцы существования Советского Союза, и вскоре для науки наступили трудные времена.

Для лаборатории диффузии в 1990 г. начался переезд в корпус «А». Многие работы были свёрнуты. Он затянулся лет на пять. Всё оборудование надо было перевезти, установить, проложить все коммуникации, создать документацию и т.д.

Как уже было сказано, для лаборатории наступили тяжёлые времена. По разным причинам проведение исследовательских и хозяйственных работ крайне осложнилось. В качестве примера можно привести работу по договору с российско-американской компанией на изготовление по чертежам «Гиредмета» двух разных установок вакуумной дуговой плавки. За одним из комплектующих изделий пришлось гонять грузовик в Грузию: в Абхазии его обстреляли, под Пермью грузовик угодил в кювет. Тем не менее, несмотря на все трудности, работа была выполнена, но на стадии запуска второй установки произошёл дефолт, фирма обанкротилась, и взаимодействие с ней прекратилось само собой. В результате из этой работы лаборатория вышла с большими моральными и материальными издержками.

Из института ушли многие специалисты. Заводы закрывались, терялись связи и возможности приобретения оборудования.

К концу 2000 г. в лаборатории осталось только 10 сотрудников. Почти все были пенсионного или предпенсионного возраста. Лаборатория сидела на голодном пайке, в ней был только один компьютер. Многие направления исследований пришлось закрыть. В частности, прекратились диффузионные исследования методом послыонного радиометрического анализа, были заморожены работы на напылительных системах, прекратились работы на ВИМ-Се и Оже-спектрометре. Фактически проводились только мессбауэровские исследования, но у лаборатории не было средств даже для покупки мессбауэровских изотопов. Исследования проводились только благодаря небольшой поддержке завода ОЦМ. Тем не менее, нужно отметить, что из-за самоотверженности оставшихся сотрудников удалось сохранить большую часть оборудования.

В 2000 г. лаборатория диффузии включается в состав отдела физики металлических наноструктур (впоследствии отдела наноспинтроники), руководимого членом-корреспондентом РАН (в 2008 г. избран академиком) В.В. Устиновым, а в 2001 г. руководителем лаборатории становится профессор, доктор технических наук В.В. Попов. К этому времени возможности для проведения научных исследований заметно улучшились. В этот период в лабораторию пришло много молодых сотрудников, большую помощь которым в период их становления оказали старейшие сотрудники лаборатории, начавшие работать ещё при В.И. Архарове: А.Н. Тимофеев, В.Н. Кайгородов, Н.К. Архипова, С.А. Матвеев.



С.В. Вонсовский (в центре) с группой участников конференции Diffusion and Defects in Solids, 26 июня–4 июля 1991 г. Слева направо. Сидят: А.Л. Николаев, Е.А. Смирнов, ?, О.М. Бакунин, Г.Г. Талуц, М.И. Куркин
Стоят: ?, С.А. Шляпников, ?, С.И. Голубов, ?, И.Ш. Трахтенберг, А.П. Дружков, Д.С. Герцрикен, С.Е. Данилов, В.Л. Арбузов, С.В. Вонсовский, ?, Г. Ахунова, ?, С.А. Плотников, Л.В. Елохина, В.И. Воронин, ?, Н.К. Архипова, А.П. Рубштейн, А.Б. Борисов, ?, ?, В. Вейкенкамп, И.М. Пшеничникова



В.В. Попов – заведующий лабораторией диффузии с 2001 г.

Укрепилась материальная база лаборатории, предприняты значительные усилия для восстановления работоспособности и модернизации имеющегося оборудования. Основные работы для этого были выполнены С.А. Матвеевым, Б.С. Слепаком, К.А. Степановым. К ВИМС «САМЕСА» подключили новый IBM-совместимый компьютер и разработали соответствующее программное обеспечение. Это позволило на несколько лет обеспечить его работоспособность. Восстановлены напылительные системы, и на них начались работы, а также работоспособность вакуумных печей, и к ним подключены регуляторы температуры. Управляющие компьютеры подключены к установке электронно-лучевого напыления «Varian» и вакуумным печам, модернизирован Оже-спектрометр посредством подключения к нему компьютера и разработки управляющих программ. Модернизирован оптический микроскоп Neophot посредством подключения к нему цифровой камеры и компьютера. Приобретены два новых мессбауэровских спектрометра и новый гамма-спектрометр. Лаборатория получила туннельный и атомно-силовой микроскопы. Куплен станок для подготовки шлифов FORCIPOL IV. Она укомплектована современными высокопроизводительными компьютерами.

В 2012 г. в лабораторию диффузии был передан спектрометр ядерного магнитного резонанса Брюкер, эксплуатируемый совместно с лабораторией кинетических явлений.

В лаборатории продолжают исследования по традиционным направлениям и начинают развиваться новые научные направления.

На восстановленном ВИМС выполнены исследования объёмной диффузии железа, кобальта, родия в монокристаллах иридия, титана, циркония, скандия, лантана, тория и вольфрама (С.М. Клоцман, А.Н. Тимофеев, Г.Н. Татарина). С использованием нового гамма-спектрометра возрождены исследования зернограничной диффузии. Проведены исследования зернограничной диффузии Со в Мо и W (В.В. Попов, А.Н. Тимофеев, Н.К. Архипова, А.В. Сергеев, А.Ю. Истомина). Проведены мессбауэровские исследования физических свойств границ зёрен в поликристаллах иридия (С.М. Клоцман, В.Н. Кайгородов), ниобия и молибдена (В.В. Попов, В.Н. Кайгородов, А.Н. Сергеев). На основе анализа этих и ранее проведённых диффузионных и мессбауэровских исследований В.В. Поповым была разработана уточнённая модель зернограничной диффузии и предложен новый метод определения параметров зернограничной диффузии на основе совместного анализа результатов диффузионных и мессбауэровских исследований, за которые В.В. Попов в 2008 г. по решению Международного консультативного комитета конференции по Диффузии в твёрдом

и жидком состоянии (Diffusion in Solids and Liquids) был награждён премией Фишера.

Восстановление работоспособности ВИМС и напылительных систем позволило выполнить два хозяйственного договора с Институтом высокотемпературной электрохимии УрО РАН, связанных с разработкой технологии получения высокочистого свинца и изготовлением и аттестацией плёночных образцов элементов для электрохимических устройств.

В лаборатории начинают проводиться исследования по термодинамическому и кинетическому моделированию фазовых превращений в сталях и сплавах. В рамках этой тематики разработаны алгоритмы и программы для расчёта равновесного фазового состава в многофазных многокомпонентных системах и эволюции выделений в сталях при термической обработке и горячей деформации. Разработанные алгоритмы для проведения термодинамических расчётов основаны на поиске свободной энергии Гиббса системы методами нелинейного программирования. Они были ориентированы, прежде всего, на проведение термодинамических расчётов в сталях, легированных сильными карбонитридообразующими элементами. Последняя версия программы позволяет проводить расчёты для систем, содержащих до 10 элементов. При этом в созданную базу термодинамических данных заложено описание порядка 50-и фаз для 14-и химических элементов. С использованием этой программы выполнялись расчёты как для сталей, так и для порошковых композиций. В настоящее время начата совместная работа с университетом Технион, Хайфа, Израиль по высокоэнтропийным сплавам, создаётся база термодинамических данных для таких расчётов.

Разработаны алгоритмы для расчёта эволюции выделений в многокомпонентных многофазных сплавах при термической обработке. Эти методы основаны на разработанном нами методе совместного решения дифференциальных уравнений диффузии, уравнений массового баланса и трансцендентных термодинамических уравнений, определяющих условия локального равновесия на межфазных границах. Для расчётов эволюции полидисперсных ансамблей выделений на различных стадиях разработан новый численный метод, основанный на использовании приближения среднего поля, при котором диффузионное взаимодействие частиц разных размерных классов с матрицей рассматривается в полевых ячейках, концентрации компонентов на границах которых одинаковы. Для проведения расчётов кинетики эволюции выделений с учётом диффузионного изменения их состава сотрудниками



А.А. Дрокина и Т.А. Матынова за микроскопом Neophot 21



А.Ю. Пасынков и И.И. Горбачев за компьютером



Л.И. Мамаева готовит образцы для исследований

лаборатории диффузии совместно с коллегами из Института математики и механики УрО РАН разработан метод, в котором использовались параллельные вычисления, что дало возможность эффективно проводить расчеты на суперкомпьютере «Уран» ИММ УрО РАН.

Разработанные алгоритмы для проведения термодинамических и кинетических расчётов были реализованы в виде ряда программ, которые защищены шестью свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ. Сейчас заканчивается разработка новой программы для моделирования структурных и фазовых превращений в сталях при горячей деформации.

В рамках этого направления исследований были выполнены три проекта РФФИ, три проекта фонда «Интелс» и два молодёжных проекта УрО РАН, а также два хоздоговора с фондом «Аусфер», в рамках кото-

рых были проведены термодинамические и кинетические расчеты поведения карбонитридных выделений в трубных сталях для Магнитогорского металлургического комбината. Было выполнено несколько хоздоговоров с Научным центром порошкового материаловедения (г. Пермь), в которых сделаны расчёты термодинамики образования нитридов, карбидов, аустенита, феррита, фуллеритов в порошковых материалах и выполнено моделирование структурно-фазового состава порошковых сталей при спекании, проведен расчёт термодинамики образования различных соединений при синтезе карбосилицида титана. Был выполнен расчёт температурной зависимости растворимости азота в немагнитных азотистых сталях при выплавке и последующей кристаллизации в рамках хоздоговора с Институтом металлургии УрО РАН.

Результаты исследований по этой тематике опубликованы в монографиях: В.В. Попов «Моделирование превращений карбонитридов при термической обработке сталей» (2004 г.) [6], В.Н. Анциферов, В.В. Попов, Л.В. Трусов и др. «Порошковые механически легированные азотистые стали с нанофазами» (2010 г.) [7], а также вошли главой в монографию «Industrial and Technological Applications in Porous Materials» [8].

По этой тематике в 2009 г. И.И. Горбачевым была защищена кандидатская диссертация на тему «Термодинамическое и кинетиче-

ское моделирование эволюции карбонитридных выделений в сплавах на основе железа». В 2009 г. за работу «Термодинамическое и кинетическое моделирование фазовых превращений в сплавах на основе железа, легированных сильными карбонитридообразующими элементами» он был награждён премией имени академика В.Д. Садовского за лучшую работу в области металловедения.

В лаборатории начали проводиться исследования нанокристаллических материалов в сотрудничестве с Институтом физики перспективных материалов Уфимского Государственного авиационного технического университета, Российским федеральным ядерным центром – Всероссийским научно-исследовательским институтом технической физики имени академика Е.И. Забабахина» (г. Снежинск), Институтом физики материалов Мюнстерского университета им. Кайзера Вильгельма, Институтом физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск). В них участвовало большинство сотрудников лаборатории диффузии (А.В. Столбовский, А.В. Сергеев, Д.Д. Кузнецов, А.А. Дрокина и др.). Многие работы проводились при участии сотрудников других лабораторий института: лаборатории прецизионных сплавов и интерметаллидов (Е.Н. Попова), лаборатории физики высоких давлений (В.П. Пилюгин), лаборатории прикладного магнетизма (А.Е. Ермаков, М.А. Уймин).

Большинство исследований выполнено на материалах, полученных интенсивной пластической деформацией. Были выполнены исследования эволюции структуры ниобия, молибдена, вольфрама, меди, никеля и бронз при интенсивной пластической деформации различными методами. Продемонстрировано, что в ряде случаев в результате интенсивной пластической деформации удаётся получить нанокристаллическую структуру и уникальные свойства. Исследована термическая стабильность полученных структур. Продемонстрирована связь дисперсности получаемой структуры и уровня прочностных свойств и термической стабильности.

Для ряда ультрамелкозернистых материалов (Nb, Mo, W, Ni и др.), полученных интенсивной пластической деформацией, выполнены исследо-



Р.М. Фалахутдинов, А.В. Столбовский и Е.В. Осинников за работой на мессбауэровском спектрометре



С.А. Чупраков и И.В. Блинов проводят измерения на ЯМР спектрометре

вания состояния границ зёрен и зернограничной диффузии. В результате этих исследований показано, что состояние границ зёрен в таких материалах значительно отличается от состояния границ в крупнозернистых материалах. Показано, что такие деформационно-модифицированные границы зёрен, которые часто называют неравновесными, характеризуются избыточным свободным объёмом. Диффузионные исследования показали, что диффузия по «неравновесным» границам зёрен протекает на несколько порядков быстрее, чем по обычным большеугловым границам рекристаллизационного происхождения.

Наряду с исследованиями ультрамелкозернистых материалов, полученных интенсивной пластической деформацией, совместно с сотрудниками лаборатории прикладного магнетизма выполнено исследование структуры и свойств внутренних поверхностей раздела в нанокристаллическом золоте, полученном методом газовой конденсации и последующего компактирования. Показано, что в этом случае его структура состоит из нанозёрен размером 10 – 20 нм, объединённых в агломераты размером десятки и сотни нанометров. Методом эмиссионной Мессбауэровской спектроскопии показано, что в структуре присутствует два типа внутренних поверхностей раздела: границы нанозёрен и агломератов. Продемонстрировано, что в данном случае в отличие от материалов, полученных интенсивной пластической деформацией, границы нанозёрен по своим свойствам близки к границам зёрен в поликристаллах.

Уже несколько лет ведутся совместные исследования с Российским федеральным ядерным центром – Всероссийским Научно-исследовательским институтом Технической Физики Имени Академика Е.И. Забабахина, посвящённые изучению влияния динамического



Участники международной конференции DIMAT 2017, Хайфа, Израиль. Слева направо: К. Тиетц (Австралия), В. Куитский (Германия), С.В. Дивинский (Германия), Л. Клиггер (Израиль), Е. Рабкин (Израиль), В.В. Попов (Россия), Е.Н. Попова (Россия), А.В. Назаров (Россия), А.В. Покоев (Россия)

канально-углового прессования на структуру и свойства металлов и сплавов. Этот относительно новый способ интенсивной пластической деформации, разработанный в РФЯЦ-ВНИИТФ, сочетает высокоскоростную деформацию и ударно-волновое воздействие. Проведённые нами исследования показали, что при использовании этого метода упрочнение и измельчение структуры достигается быстрее, чем при равноканальном угловом прессовании, но существует опасность образования перколяционной пористости и трещин. Показано, что после такой деформации, как и после других способов интенсивной пластической деформации, границы зёрен находятся в «неравновесном» деформационно-модифицированном состоянии.

Результаты исследования границ зёрен, структуры и свойств наноструктурных материалов вошли главами в две монографии: «Current Trends in Chemical Engineering» [9] и «Niobium: Chemical Properties, Applications and Environmental Effects» [10]. В рамках этого научного направления выполнены два проекта Президиума РАН, восемь проектов РФФИ, включая совместные проекты с Уфимским Государственным авиационным техническим университетом и с Мюнстерским университетом им. Кайзера Вильгельма, а также Интеграционный проект УрО и СО РАН, совместный с Институтом физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск), три проекта Ориентированных фундаментальных исследований УрО РАН, три молодёжных проекта УрО РАН, выполняются соглашения с РФЯЦ-ВНИИТФ.

В 2012 г. по этой тематике была защищена кандидатская диссертация А.В. Столбовским на тему «Структура и особенности состояния границ зёрен ниобия, меди и бронзы, наноструктурированных интенсивной пластической деформацией».

С самого начала включения лаборатории диффузии в отдел наноспинтроники в ней начинают проводиться исследования структуры и свойств слоистых наноструктур. Большинство этих исследований проводилось совместно с сотрудниками лабораторий электрических явлений (М.А. Миляев, Е.А. Кравцов, Н.С. Банникова и др.) и прецизионных сплавов и интерметаллидов (Т.П. Криницина) под общим идейным руководством академика В.В. Устинова. От лаборатории диффузии в них участвовали В.В. Попов, В.Н. Кайгородов, С.А. Матвеев, И.В. Блинов, С.А. Чупраков.

Были усовершенствованы установки для ионно-плазменного и электронно-лучевого напыления, на них получены слоистые магнитные металлические наноструктуры с однонаправленной обменной анизотропией и исследованы их структура и физические свойства. Проведены исследования влияния способа и температуры напыления на структуру, шероховатость поверхности и магнитные свойства плёнок Со. Установлено, что с повышением температуры подложки шероховатость поверхности плёнок Со, определяющая шероховатость интерфейсов бислоев, уменьшается, а коэрцитивная сила

увеличивается. Показано, что шероховатость в плёнках, полученных электронно-лучевым напылением, больше, чем в плёнках, полученных магнетронным напылением. Методами электронной микроскопии и эмиссионной мессбауэровской спектроскопии выполнены исследования плёнок Co и бислоёв Co/CoO, нанесённых методом магнетронного напыления на монокристаллические подложки MgO и Al₂O₃. Изучены поверхностные, объёмные и межслойные эмиссионные ядерные гамма-резонансные спектры различных плёнок и бислоёв. Мессбауэровские исследования межфазной границы бислоёв Co/CoO показали, что атомы ⁵⁷Co(⁵⁷Fe), расположенные в районе межфазной границы, могут находиться в различных магнитных состояниях (парамагнитном, ферромагнитном и состоянии, напоминающем антиферро-магнитное), иметь различные валентности и химическое окружение. Это свидетельствует о топологической разупорядоченности спиновой конфигурации и сложном характере магнитного взаимодействия на межфазной границе в таких системах.

Отработана технология получения тонких гетерогенных плёнок на основе тройного сплава Ni-Fe-Mn. Проведено исследование фазового состава, структуры, магнитных и магнито-резистивных свойств полученных плёнок. Показано, что данный сплав может быть использован в качестве закрепляющего слоя в спиновых клапанах. Установлены оптимальные условия получения слоистых наноструктур с заданными магнитными свойствами (температурой блокировки, полем смещения петли гистерезиса) путём изменения состава сплава, типа подложки, толщин слоёв и технологических режимов.

Установлен механизм формирования упорядоченной антиферромагнитной Ni-Fe-Mn фазы при термоманитной обработке бислоёв марганец/пермаллой. Показано, что при отжиге марганец проникает в пермаллой по границам кристаллитов, а затем диффундирует от границ в приграничные объёмы матрицы. При этом образования сплошной антиферромагнитной прослойки между слоями не происходит. Формирование упорядоченной антиферромагнитной фазы Ni-Fe-Mn в бислоях пермаллой/марганец приводит к высоким значениям обменного смещения и температуры блокировки. Разработана технология создания спинового клапана на основе упорядоченной антиферромагнитной фазы Ni-Fe-Mn, обладающего высокой температурной стабильностью.

Методами ядерного магнитного резонанса, рентгеновской рефлектометрии, рентгеновской дифракции и просвечивающей электронной микроскопии исследованы структурные особенности сверхрешёток [Co/Cu]_n, приготовленных магнетронным напылением. Показано, что с увеличением числа бислоёв уменьшается доля атомов кобальта, участвующих в формировании «совершенного» сопряжения слоёв Co/Cu, уменьшается толщина интерфейсов и снижается магниторезистивный эффект. При этом межатомные расстояния и напряжённое состояние в слоях кобальта и интерфейсах не меняются. Исследовано влияние от-



2017 г. Слева направо. Сидят: Р.М. Фалахутдинов, А.В. Столбовский, Л.И. Мамаева, В.В. Попов, Т.А. Матынова, И.И. Горбачев. Стоят: А.Ю.Пасынков, Б.С. Слепак, Е.В. Осинников, М.Е. Стулак, С.А. Чупраков, С.В. Блинов, А.А. Дрокина, К.А. Степанов, С.А. Матвеев

жига на состояние интерфейсов и магниторезистивные свойства свехрешёток. Показано, что с увеличением температуры отжига происходит изменение состояния интерфейсов: уменьшается доля «совершенных» интерфейсов, возрастает число атомов кобальта, участвующих в формировании межслойных границ, а также возрастает шероховатость межслойных границ, следствием чего является уменьшение магнитосопротивления.

Совместно с лабораториями физического металловедения (В.М. Счастливцев), микромагнетизма (И.В. Гервасьева) и прецизионных сплавов и интерметаллидов (Д.П. Родионов) выполнено исследование влияние состояния подложки – ленты никелевого сплава Ni-11 ат.%Cr и параметров напыления на текстуру и шероховатость поверхности буферного слоя YSZ (ZrO₂-Y₂O₃), наносимого на никелевый сплав перед нанесением плёнок сверхпроводящего соединения YBa₂Cu₃O_{7-x}, чтобы предотвратить образование непроводящего слоя оксида никеля и диффузии никеля в сверхпроводящий слой. В результате проведённых исследований показано, что наличие острой кубической текстуры в ленте никелевого сплава не является достаточным условием получения биаксиальной текстуры в плёнке YSZ. Значительно лучшие результаты получаются, если лента никелевого сплава подвергается не только рекристаллизационному отжигу, обеспечивающему получение острой кубической текстуры, но и дополнительному отжигу, обеспечивающему формирование на поверхности двухмерной (2x2) сверхструктуры серы.

По тематике, посвящённой исследованию структуры и свойств слоистых наноструктур, лаборатория участвовала в выполнении трёх проектов Президиума РАН, проекта РФФИ, двух молодых проектов УрО РАН.

В 2017 г. по этой тематике И.В. Блиновым защищена кандидатская диссертация на тему «Магнитные и магниторезистивные

свойства слоистых наноструктур на основе антиферромагнитного тройного сплава Ni-Fe-Mn».

Лаборатория диффузии по-прежнему сохраняет высокий авторитет в научном сообществе. Это отражается, в частности, в том, что заведующий лабораторией В.В. Попов является членом международных консультативных комитетов большинства международных конференций по диффузии и членом редколлегии международного журнала Diffusion Foundations. В 2015 г. он был редактором (совместно с Е.Н. Поповой) специального выпуска этого журнала, содержащего обзоры ведущих учёных, посвящённых структуре, термодинамике и диффузионным свойствам границ зёрен и интерфейсов [11].

В.В. Попов

Список литературы

1. В.С. Бугаков, В.Д. Нескучаев, *Диффузия металлов*, Гос. науч.-техн. изд-во, Харьков-Киев (1937), 93 с.
2. В.С. Бугаков, *Диффузия в металлах и сплавах*, Гос. изд-во техн.-теор. лит., Ленинград-Москва (1949), 212 с.
3. В.И. Архаров, *Окисление металлов при высоких температурах*, Metallurgizdat, Москва-Свердловск (1945), 171 с.
4. В.И. Архаров, *Газовое хромирование*, в сб. Труды ИММ УФАН, (1945), Вып. 4, 76 с.
5. В.И. Архаров, *Кристаллография закалки стали*, Metallurgizdat, Свердловск-Москва (1951), 43 с.
6. В.В. Попов, *Моделирование превращений карбонитридов при термической обработке сталей*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2003), 380 с.
7. Анциферов В.Н., Попов В.В., Трусов Л.В., Оглезнева С.А., Зубко И.Ю., Горбачев И.И., *Порошковые механически легированные азотистые стали с нанофазами*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2010), 33 с.
8. V.V. Popov, in *Industrial and Technological Applications in Porous Material*, Ed. by J.M.P.Q. Delgado, Springer, Berlin Heidelberg (2013), 281 p.
9. V.V. Popov, in *Current Trends in Chemical Engineering*, Ed. by J.M.P.Q. Delgado, 345 p.
10. V.V. Popov, E.N. Popova, in *Niobium: Chemical Properties, Applications and Environmental Effects*, Nova Science Publ., New York, USA (2013), P. 1.
11. *Structure, Thermodynamics and Diffusion properties of Grain Boundaries and Interfaces*, Ed. by V.V. Popov and E.N. Popova, Diffusion foundations, 2015, Vol. 5, P. 2296-3650.

ЛАБОРАТОРИЯ КВАНТОВОЙ НАНОСПИНТРОНИКИ

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Демокритов Сергей Олегович, заведующий лабораторией, *phD*
- Антропов Николай Олегович, младший научный сотрудник
- Корх Юлия Владимировна, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Кравцов Евгений Алексеевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Лобов Иван Дмитриевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Немытова Ольга Владимировна, научный сотрудник, к.т.н.
- Никова Екатерина Сергеевна, ведущий инженер
- Петров Илья Андреевич, инженер-исследователь
- Проглядо Вячеслав Витальевич, научный сотрудник
- Рябухина Марина Викторовна, младший научный сотрудник
- Саламатов Юрий Александрович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Телегин Андрей Владимирович, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Якунина Елена Михайловна, младший научный сотрудник

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ КВАНТОВОЙ НАНОСПИНТРОНИКИ

На момент подготовки данного юбилейного издания, посвящённого истории Института физики металлов, лаборатория квантовой наноспинтроники являлась самой молодой лабораторией в институте как в смысле продолжительности своего существования, так и среднего возраста сотрудников лаборатории, и также первой лабораторией, созданной в институте в рамках исполнения научно-исследовательского гранта. Но, обо всём по порядку.

Лаборатория квантовой наноспинтроники была создана по приказу директора Института (№ 12 от 05 февраля 2014 г.) в соответствии с решением о выделении гранта (далее – мегагрант), принятым 26 декабря 2013 г. Советом по грантам Правительства Российской Федерации, для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих учёных в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования, научных учреждениях государственных академий наук и государственных научных центрах Российской Федерации по теме: «Магнитные устройства нанооптики с управляемыми потерями и шумами, функционирующие на микроволновых частотах» (проект №14.Z50.31.0025). Грант давался на три года, с возможностью продления ещё на 2 года. Сумма гранта на три года, выделенного Минобрнауки РФ, составила около 88 млн. рублей, ещё 22 млн. рублей Институт должен был внести из собственных средств. Подробную информацию о программе мегагрантов и результатах её реализации в России можно найти в [1].

Ведущим учёным проекта и, согласно условиям мегагранта, заведующим новой лабораторией стал гражданин Германии, профессор Института прикладной физики Мюнстерского университета (Германия) к.ф.-м.н. Сергей Олегович Демокритов (S.O. Demokritov). Научные интересы С.О. Демокритова лежат



Заведующий лабораторией квантовой наноспинтроники С.О. Демокритов



Заместитель заведующего лабораторией квантовой наноспинтроники А.В. Телегин



Ю.В. Корх



В.В. Проглядо

в области физики магнитных явлений, распространения волн в ферромагнитных плёнках и наноструктурах, спин-зависящих явлений, динамики магнитных наносистем, квантовой магнитной термодинамики, магнитных устройств памяти [2].

Широкое международное научное признание получили следующие результаты С.О. Демокритова:

- обнаружение Бозе-Эйнштейновской конденсации магнов при комнатной температуре (Nature, 2006);
- картирование спиновых волн, излучённых spin-torque нано-осцилляторами (Nat. Mat, 2010);
- обнаружение обратного переноса углового момента между магнитными подсистемой и решёткой (Nat. Mat. 2011);
- обнаружение спин-Холл наноосцилляторов (Nat. Mat 2012);
- разработка спектрометра микрофокусного Мандельштам-Бриллюэновского рассеяния света (micro-BLS) с предельным временным (<200 ps) и пространственным (< 250 nm) разрешением.

Мотивы, побудившие С.О. Демокритова к совместной работе с Институтом физики металлов, и собственное видение задач мегагранта приведены в его интервью газете «Наука Урала» [2].

Научным руководителем проекта был выбран директор ИФМ, академик РАН В.В. Устинов, административным руководителем – зам. директора института, член-корр. РАН А.Б. Ринкевич. За три года им предстояло провести масштабные действия по организации научной работы лаборатории квантовой наноспинтроники: формированию коллектива, обеспечению помещениями и научным оборудованием, планированию научной работы, согласованию научных задач и взаимодействия с другими подразделениями института. О первых позитивных результатах выполнения гранта можно узнать в интервью А.Б. Ринкевича в интервью газете «Наука Урала» [3].

9 июля 2014 г. приказом директора института № 78 был утверждён первоначальный коллектив исполнителей мегагранта в составе 28 человек. Все они были собраны из состава различных лабораторий института в соответствии с их научным профилем и предполагаемым направлением деятельности в рамках мегагранта. В дальнейшем состав исполнителей увеличился до 46 человек. Непосредственно в штат новой лаборатории, созданной в рамках гранта, первоначально вошли 11 человек. Кроме научных сотрудников, сюда вошли также инженеры и аспиранты. К концу третьего года штат лаборатории вырос до 14 человек.

В соответствии с условиями гранта ведущий учёный должен не менее 4 месяцев в году проводить в организации-исполнителе гранта. Обязанности заместителя заведующего лабораторией на время его отсутствия в России были возложены на бывшего сотрудника лаборатории магнитных полупроводников с.н.с. А.В. Телегина.

В 2014–2015 гг. в кратчайший срок силами института были подготовлены служебные помещения для сотрудников и заведу-

ющего лабораторией, рабочие (чистые) помещения для спектрального комплекса комбинационного рассеяния света (спектроскопии рассеяния Мандельштама-Бриллюэна), сканирующего зондового микроскопа, установки вакуумного осаждения металлов из паровой фазы, ТГц спектрометра, рентгеновского дифрактометра и др. Это позволило научным сотрудникам максимально быстро приступить к вводу в эксплуатацию и освоению нового экспериментального оборудования и работе над проектом.

Ключевой особенностью реализации программы мегагрантов в институте стала тесная интеграция персонала новой лаборатории и задач проекта с текущими научными исследованиями и научными коллективами института. Расчёт делался на то, чтобы после окончания проекта, когда прекратится внешнее финансирование, новая лаборатория могла и дальше функционировать в рамках научной тематики отдела наноспинтроники, персонал получал зарплату, а научное оборудование существенно расширило и дополнило имеющиеся экспериментальные возможности всего института.

С учётом задач мегагранта, темы государственного задания «Спин» и общей проблематике отдела наноспинтроники института общее научное направление деятельности лаборатории квантовой наноспинтроники было сформулировано как: «Нейтронная, электронная и электромагнитная диагностика атомной и магнитной структуры слоёв и интерфейсов планарных наносистем», что отражено и в эмблеме лаборатории.

Основные научные задачи новой лаборатории тесно связаны с новой перспективной областью науки и техники – магноники. Магноника предоставляет необычно широкие возможности революционных решений для устройств, принадлежащих к технологически важным областям, таким, как телекоммуникации, компьютерная техника и радиочастотные применения. Следует отметить, что существует два семейства устройств магноники – основанных на спин-поляризованных электрических токах и основанных на чисто спиновых токах. Преимуществом первого семейства считается лёгкость создания спин-поляризованного электрического тока в ферромагнитных металлах, а достоинством второго – возможность работы с диэлектрическими магнетиками. Хотя основным достоинством устройств магноники является их гибкость и возможность управления, стандартный подход в построении цепей передачи сигнала в магнонике страдает несколькими недостатками. Они вызваны, главным образом, достаточно сильным затуханием спиновых волн (магнонов). В течение последних 20 лет было теоретически показано, что для компенсации спин-волнового затухания могут быть использованы спиновые токи. Это открытие обеспечивает новые горизонты для создания магнонных цепей связи.

Таким образом, основная идея мегагранта заключалась в глубоком понимании процесса распространения электромаг-



О.В. Немытова



И.А. Ясюевич



И.Д. Лобов



Ю.А. Саламатов



Е.А. Толмачева



И.А. Петров



Е.С. Никова

нитных и спиновых волн в магнитных структурах микро- и нанометрового размера и в разработке подходов применения динамических магнитных явлений на наноуровне с целью создания нового поколения высоко-интегрированных компонент и приборов магноники для передачи и обработки данных на микроволновых частотах. Предложенная в проекте магнитная нанооптика использует гибридизацию электромагнитных волн микроволнового диапазона с магнитными колебаниями в ферромагнитных материалах. Предполагалось отработать способ компенсации потерь спиновых волн в магнитных микро- и наноструктурах приложением к микроволновому диапазону концепции усиления, используемой в оптических методах передачи.

Главная научная цель проекта состоит в изучении прохождения микроволновых сигналов, созданных спиновыми волнами, в магнитных микро- и наноструктурах при инъекции спиновых токов. Главная прикладная цель заключается в создании нового поколения высокоинтегрированных компонент и устройств передачи и обработки данных, функционирующих на микроволновых частотах с ранее не достигнутыми показателями и основанных на магнитных наноструктурах с управляемыми потерями и шумами. Специальное внимание в проекте уделяется тонкоплёночным гибридным структурам, содержащим магнитные и немагнитные слои металлов и неметаллов, обладающими малыми потерями прохождения СВЧ-сигнала.

Исходя из цели проекта видно, что ключевую роль в проекте играют исследования магнитной динамики в гибридных микро- и наноструктурах, ставшие возможными благодаря покупке институтом уникальной установки макро- и микрофокусного Бриллюэновского рассеяния света на базе интерферометра Фабри-Перо компании JRS Instruments. В России таких установок пока всего две. Данная установка предназначена для анализа спектра магнитных возбуждений (магнонов, спиновых волн) в твёрдом теле оптическим методом в области частот от нескольких ГГц до 1 ТГц. Интерферометр позволяет разрешить волновые вектора в диапазоне от 0 до $2,4 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$ с высокой чувствительностью, контраст достигает $1:10^{10}$. В частности, в данной установке реализуется визуализация процессов взаимодействия/возбуждения/распространения магнитостатических спиновых волн в структурированных образцах с высоким пространственным ($\sim 260 \text{ нм}$) и временным ($\sim 1 \text{ нс}$) разрешением. Надо отметить, что наставником в работе на этой установке, помимо С.О. Демокритова, выступил с.н.с. лаборатории магнитных полупроводников, В.Д. Бессонов, который в 2014 г. в университете Белостока, Польша, защитил диссертацию на степень PhD по нелинейной динамике спиновых волн в железиттриевом гранате.

Отмечу, что в институте имеется своя хорошая экспериментальная база для оптической, СВЧ-, радио- и ИК-спектроскопии

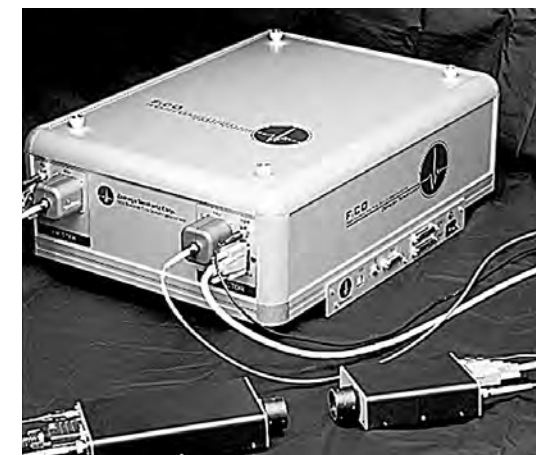
твёрдых тел. Но при этом существовал известный «провал» в ТГц-диапазоне.

Для стыковки с СВЧ-диапазоном на средства гранта был приобретен волоконный терагерцовый спектрометр «FICO-2-EK», предназначенный для изучения высокочастотных свойств материалов на пропускание и отражение электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,1–4 ТГц с временными разрешениями до 100 пс. Система предназначена для высокоскоростной спектроскопии и имиджинговых 2D-измерений в энглзирирование с неразрушающим контролем. Данный прибор используется в проекте для характеристики получаемых и исследуемых микро(нано-) структур на основе полупроводниковых и металлических магнитных плёнок в диапазоне длин волн 100 мкм – 3 мм.

Еще раз повторюсь, что одна из целей мегагранта состоит в создании основ для разработки нового поколения устройств магнонной логики. Концепция магнонной логики как элементов памяти основана на распространении спиновых волн в микроскопических волноводах и управлении ими созданными динамическими магнитными полями. Подобная же ситуация существует в магнонных кристаллах. Таким образом, данный подход требует налаженной технологии синтеза специально сконструированных слоистых микро- и наноразмерных металлических и полупроводниковых структур.

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева является ведущей организацией в России в области спинтроники магнитных металлических наноструктур и имеет необходимый комплект ростовых и аттестационных установок. В ИФМ есть комплекс «чистые комнаты», в составе которого имеются установки молекулярно-лучевой эпитаксии, магнетронного напыления, лазерной абляции, литографический комплекс, микросварка, оптическая и электронная микроскопия высокого разрешения и т.д.

На средства гранта были приобретены современные установки: магнетронного напыления PVD75, реактивно-ионного травле-



ТГц спектрометр



СЗМ «Некст»



Интерферометр



Дифрактометр

ния PlasmaProNGP80 и химического газофазного осаждения EasyTube™ 3000. Данные установки позволяют синтезировать гетеро- и многослойные металлические и полупроводниковые плёночные структуры (в том числе графеновые), создавать из них сложные планарные микро- и наноструктуры и наносить контактные площадки заданной конфигурации. Для физико-химической характеристики с высоким пространственным разрешением получаемых микро- и наноструктур были приобретены автоматизированный сканирующий зондовый микроскоп «Солвер Некст» (Россия) и рентгеновский дифрактометр Empyrean PANalytical B.V. Рентгеновский дифрактометр используется в проекте для аттестации получаемых тонкоплёночных структур при различных внешних условиях (температура, магнитное поле и т.д.): проведения качественного и количественного фазового анализа плёночных объектов и исследование текстур, шероховатости плёнок, определения степени кристалличности и ориентировки монокристалльных блоков, определения атомной структуры вещества, включающего пространственную группу элементарной ячейки, её размеры и форму, а также группы симметрии кристалла, уточнение параметров решётки. Данная установка была выделена в отдельный сектор в составе лаборатории. Руководителем сектора рентгеновской рефлектометрии был назначен с.н.с. Е.А. Кравцов.

Вместе с ним в данный сектор вошли его аспиранты: Н.О. Антропов, М.В. Рябухина, Е.М. Якунина.

В целом можно выделить три основных направления траты средств мегагранта на дорогостоящее оборудование: 1) установка микрофокусного Бриллюэновского рассеяния света, 2) установка рентгеновского дифрактометра, 3) установки для синтеза тонких



Комплекс «чистые помещения» ИФМ УрО РАН

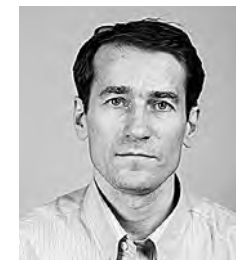
плёнок. Все они взаимосвязаны и дополняют друг друга. Отмечу, что все дорогостоящее оборудование, приобретённое в рамках мегагранта, стоит на балансе лаборатории квантовой наноспинтроники и может использоваться в режиме центров коллективного пользования «ЦКП технологий спинтроники» института.

В 2015 г., практически в годовщину создания новой лаборатории, в рамках весенней сессии Института физики металлов была проведена отдельная секция, посвящённая мегагранту, на которой промежуточные результаты работы и план работ на будущее представил ведущий учёный и руководитель проекта С.О. Демокритов. Организаторами секции как знакового события для российской науки в целом выступили представители института и российского-немецкого Дома дружбы и прессы (г. Москва).

Первоначально грант выделялся на период с 2014 по 2016 гг. Далее участникам гранта необходимо было пройти суровую конкурсную борьбу среди желающих подать заявку на продление гранта и успешно сдать ежегодный и итоговый отчёты.

11 апреля 2017 г. Советом по грантам Правительства Российской Федерации были приняты отчёты ведущего учёного С.О. Демокритова о проведённом научном исследовании и отчёт ИФМ УрО РАН о целевом использовании средств гранта, и фактически закреплено ранее принятое Советом (26 декабря 2016 г.) решение о продлении мегагранта в ИФМ УрО РАН на 2017–2018 гг. Подробную информацию о результатах реализации данного проекта в институте, список научных статей, опубликованных членами научного коллектива мегагранта по направлению научного исследования за отчетный период, можно найти на сайте института [5] и сайте Минобрнауки РФ.

Основным и самым важным результатом работы по мегагранту является разработанная концепция будущего магнетронного устройства. Известно, что типовой магнетронный прибор содержит, по крайней мере, три основные части: а) источник спиновых волн, основанный на наноосцилляторе, связанном с волноводом; б) функциональную среду для управления сигналом; в) спин-волновой детектор, подобный источнику спиновых волн, но функционирующий в обратном порядке. Для всех этих трёх компонентов затухание спиновых волн и вызванные им потери имеют критическое значение. Распространение спиновых волн в функциональной среде с низким затуханием делает возможным разработку более сложной архитектуры цепей, а функциональность источника спиновых волн в целом основывается на (сверх)компенсации затухания. Было показано, что магнитные потери спин-волновых мод, существующих в магнитном диске, например, из железонитридевого гранта (ЖИГ), можно уменьшить, используя чисто спиновый ток, созданный в системе ЖИГ/Pt. Более того, при сверхкомпенсации потерь возникают магнитные авто-осцилляции, управляемые чисто спиновым током. Таким образом, был реализован,



Руководитель сектора рентгеновской рефлектометрии лаборатории квантовой наноспинтроники Е.А. Кравцов



М.В. Рябухина



Е.М. Якунина



Н.О. Антропов

первый магнитный наноосциллятор из магнитного диэлектрика [6]. При этом, используя чисто спиновый ток, было получено увеличение длины распространения спиновых волн в ЖИГ почти в 10 раз. Был также показан эффективный способ возбуждения спиновых волн с использованием механизма нелокальной спиновой инжекции в среде из 3d-металлов и их сплавов [7]. Для повышения выходной мощности возможных устройств была разработана и успешно опробована идея взаимной синхронизации массива магнитных нано-осцилляторов, где потери скомпенсированы чисто спиновым током, генерированным за счёт механизма нелокальной спиновой инжекции [8]. Для практических приложений высокоскоростных интегрированных магнитных цепей важна способность спин-волнового источника генерировать короткие волновые пакеты. Экспериментально была продемонстрирована возможность использования таких сверхкоротких (меньше 1 нс) импульсов спинового тока, чтобы генерировать спиновые волны, распространяющиеся в наноразмерных магнитных волноводах [9]. Таким образом, были предложены физические механизмы функционирования и апробированы конкретные материалы для всех трёх основных частей типового магного прибора «электроники 21 века».

Напоследок нужно отметить, что в соответствии с рекомендациями «грантодателя» к моменту подготовки данного выпуска лаборатория находилась в стадии очередного масштабного преобразования, которое должно привести к увеличению числа её сотрудников и научных секторов. Данные изменения направлены на дальнейшее повышение качества научных исследований и количества опубликованных высокорейтинговых работ, что необходимо для успешного завершения мегагранта и создания задела для появления новых научных направлений и лабораторий в институте. Время покажет!

А.В. Телегин

Список литературы

1. <http://p220.ru/>
2. <https://www.uni-muenster.de/Physik.AP/Demokritov/en/>
3. А. Понизовкин, газ. «Наука Урала», № 6, 4 (2014).
4. П. Киев, газ. «Наука Урала», № 7-8, 7 (2015).
5. http://www.imp.uran.ru/?q=ru/about_laboratory&lab=10
6. M. Collet, X. de Milly et al., Nature Comm. **7**, 10377 (2016).
7. V.E. Demidov, S. Urazhdin, R. Liu, B. Divinskiy, A. Telegin, S. O. Demokritov, Nature Comm. **7**, 10466 (2016).
8. O. Dzyapko, I.V. Borisenko, V.E. Demidov, W. Pernice, S.O. Demokritov, Appl. Phys. Lett. **109**, 232407 (2016).
9. B. Divinskiy, V.E. Demidov, S.O. Demokritov, A.B. Rinkevich, S. Urazhdin, Appl. Phys. Lett. **109**, 252401 (2016).

ЛАБОРАТОРИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Михалев Константин Николаевич, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.
- Алексахин Борис Алексеевич, старший инженер, к.ф.-м.н.
- Арапова Ирина Юрьевна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Бабанова Ольга Анатольевна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Бахарев Сергей Михайлович, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Борич Михаил Александрович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Бузлуков Антон Леонидович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Верховский Станислав Владиславович, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Волкова Зоя Насимьяновна, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Геращенко Александр Павлович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Гермов Александр Юрьевич, младший научный сотрудник
- Голобородский Борис Юрьевич, главный специалист, к.ф.-м.н., доцент
- Кобелев Александр Владимирович, старший инженер, к.ф.-м.н.
- Кононихина Вера Владимировна, инженер
- Кулеев Иван Игоревич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Кулеев Игорь Гайнитдинович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Медведев Евгений Юрьевич, старший инженер, к.ф.-м.н.
- Оглобличев Василий Владимирович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Окулова Клара Алексеевна, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Пискунов Юрий Владимирович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Савченко Сергей Павлович, инженер-исследователь
- Садыков Алмаз Фаритович, младший научный сотрудник
- Скорюнов Роман Валерьевич, младший научный сотрудник
- Скрипов Александр Владимирович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Смольников Алексей Геннадьевич, младший научный сотрудник
- Солонинин Алексей Викторович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Танкеев Анатолий Петрович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ КИНЕТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Лаборатория кинетических явлений была создана в феврале 1969 г. по инициативе д.ф.-м.н. профессора Павла Степановича Зырянова, который и стал первым заведующим (1969–1974 гг). Состав лаборатории (1969 г.): 10 сотрудников (5 теоретиков, 5 экспериментаторов). Цель создания: развить самые современные экспериментальные методики для анализа электронной структуры твёрдых тел, а также разрабатывать теоретические модели электронной структуры металлов и сплавов и апробировать их в рамках одной лаборатории. Оборудование: один спектрометр ЯМР, один спектрометр ЭПР.

Павел Степанович Зырянов

Первый заведующий и основатель лаборатории Павел Степанович Зырянов или ПС, как его называли друзья и коллеги, родился в 1922 г. в деревне Перебор (Свердловская область), в январе 1941 г. окончил горно-металлургический техникум по специальности «маркшейдерское дело», воевал и окончил войну в Берлине. После окончания Великой Отечественной войны поступил в Уральский государственный университет (Свердловск), где работал лаборантом и учился, успешно закончил его. После получения диплома поехал в Москву и поступил в аспирантуру в МГУ к профессору А.А. Власову. Основное направление научной деятельности его в это время – теоретическое исследование кинетических явлений в конденсированном состоянии в пе-



Павел Степанович Зырянов на отдыхе

риодическом поле ионов [1]. В 1954 г. он защитил кандидатскую диссертацию на тему «Некоторые приложения коллективных взаимодействий к теории металлов», после которой возвращается в Свердловск, где он работает сначала старшим преподавателем а затем (в 1955 г.) доцентом на физико-техническом факультете Уральского политехнического института. Как отмечали его коллеги и друзья [2], ПС читал лекции предельно четко и ясно, в то же время на высоком научном уровне, хотя тематика лекций была весьма разнообразной и затрагивала самые сложные разделы теоретической физики и математики. Это были курсы аналитической механики, электродинамики, гидро- и газодинамики, физики атомного ядра, квантовой механики, физики твёрдого тела, квантовой химии и т.д.

Наряду с преподавательской деятельностью ПС продолжает активно заниматься наукой. Он получает новые результаты, исследуя флуктуации спиновой плотности в электронной плазме, электрические явления в вырожденной электронно-ионной плазме, спектр возбуждений электронного газа в магнитном поле.

В 1961 г. ПС переходит на работу в Институт физики металлов АН СССР на должность старшего научного сотрудника. В это время он занимается изучением термомагнитных явлений в металлах и полупроводниках в магнитном поле. Полученные результаты легли в основу его докторской диссертации «Квантовая теория термомагнитных явлений в металлах и полупроводниках», которая была защищена в 1965 году. ПС успешно совмещал научную работу в ИФМ с преподаванием в университете и в 1969 г. получил звание профессора. В этом же году по его инициативе и создаётся новая лаборатория в институте – лаборатория кинетических явлений.

О человеческих качествах ПС лучше всего написал его коллега и друг Борис Николаевич Филиппов [2]: «Всегда доброе отношение к окружающим, не зависимое ни от чинов и положения, ни от национальности, ни от профессии и образовательного ценза. Он не просто был готов помогать, он всегда помогал конкретными делами своим друзьям и близким. Он чрезвычайно добросовестно подходил к любому делу...».

ПС трагически погиб в автокатастрофе 24 марта 1974 г.

Основные научные направления лаборатории на этапе формирования и в первые годы существования:

- Исследование нелинейных гальваномагнитных явлений в скрещенных электрических и квантовых магнитных полях.
- Изучение квантовых электронных и акустических волн, поглощения ультразвука электронами проводимости (теория совместно с В.П. Силиным и В.И. Окуловым).
- Экспериментальное исследование возбуждения ультразвуковых волн в металлах радиочастотным полем (метод гамма-резонанса совместно с И.А. Дубовцевым и Н.И. Филипповой)

- Фазовые переходы в твёрдых телах, потеря устойчивости кристаллических решёток.
- Экспериментальное исследование локализованных магнитных моментов на примесных атомах [2, 3].

В те годы научные исследования проводились очень интенсивно и с необычайным душевным подъёмом. В.И. Окулов вспоминает, что теоретики проводили семинары каждый день, причём каждый раз докладчик менялся. П.С. Зырянов, например, в год публиковал в среднем 5 работ в ведущих научных журналах (ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ, ...)! Причём тематика работ была весьма широка. Наряду с перечисленными выше научными направлениями опубликовано несколько работ по биофизике: о природе сил взаимодействия между хромосомами, о механизмах авторепродукции элементарных клеточных структур, и др. Эти работы были инициированы разговорами с известным биофизиком Тимофеевым-Ресовским, семинары которого ПС часто посещал с коллегами-теоретиками.

В начале 70-х годов лаборатория располагалась в двух зданиях: корпус № 4 (спектрометры ЯМР и ЭПР, часть экспериментаторов), здание гидроэкструзии (спектрометры гамма-резонанса, теоретики). Экспериментальная база составляла 1 стационарный спектрометр ЯМР с электромагнитом (магнитное поле до 15 кЭ), производства СКБ научного приборостроения (Ленинград) и стационарный спектрометр ЭПР с электромагнитом, произведённый в Германии (ГДР), 2 спектрометра гамма-резонанса.

После трагической смерти П. С. Зырянова в 1974 году заведующим лабораторией стал кандидат физ.-мат. наук., Адольф Петрович Степанов.

Дальнейшее развитие получило в эти годы экспериментальное оборудование.

В лаборатории было: 2 спектрометра ЯМР, 1 спектрометр ЭПР, 2 спектрометра гамма-резонанса, рентгеновский дифрактометр, установка по измерению магнитной восприимчивости (создана в 1984 г. на базе старого спектрометра ЭПР, метод Фарадея, диапазон температур 4,2 – 900 К).

Интенсивно развивались **новые направления исследований**.

- Диффузия водорода в гидридах на основе редкоземельных и переходных металлов (А.П. Степанов, А.В. Скрипов, М.Б. Беляев).
- Особенности электронной и кристаллической структуры сверхпроводников (С.В. Верховский, Б.А. Алексахин, К.Н. Михалев, А.В. Скрипов).
- Исследование магнитных сплавов на основе железа методами гамма-резонанса (В.В. Юрчиков, В.А. Шабашов, В.А. Цурин, Е.П. Елсуков).



Адольф Петрович Степанов, руководил лабораторией кинетических явлений с 1974 по 1991 г.

- Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) в тонких плёнках лития (А.А. Романюха, В.В. Устинов), позже – ЭПР в гетероструктурах FeCr.
- Изучение ближнего порядка в твёрдых телах и аморфных сплавах методами рентгеновской спектроскопии (Ю.А. Бабанов, Н.В. Ершов).

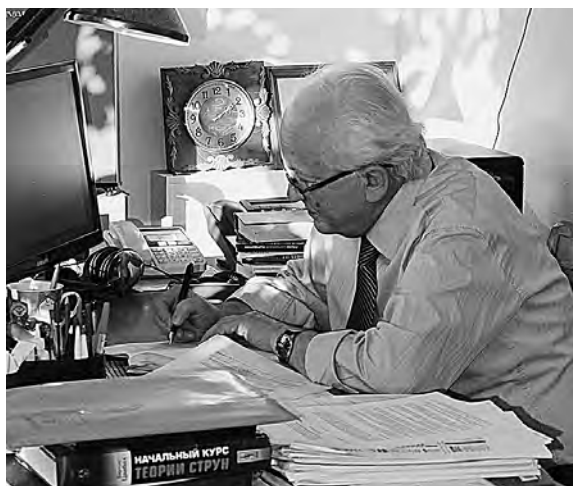
Дальнейшее развитие лаборатория получила под руководством д.ф.-м.н. профессора Анатолия Петровича Танкеева (с 1991 по 2013 г.).

Анатолий Петрович Танкеев вспоминает

В начале 1991 г. меня вызвал директор Института Виталий Евгеньевич Щербинин и предложил возглавить лабораторию кинетических явлений: её руководитель Адольф Петрович Степанов достиг пенсионного возраста. Я сказал, что это очень ответственное дело и выразил сомнение, что не справлюсь с этой сложной задачей. Все-таки лаборатория кинетических явлений – сугубо экспериментальная лаборатория. Потом у меня был разговор с Адольфом Петровичем (я был с ним знаком ещё со студенческой скамьи, он читал нам на физико-техническом факультете Уральского политехнического института имени С.М. Кирова курс «Экспериментальные методы ЯМР- и ЭПР-спектроскопии»). Он говорил, что предложение директора Института нужно принять, поскольку уже прошёл слух, что лабораторию могут расформировать по другим лабораториям, в ней всего 13 сотрудников, а её необходимо сохранить. Он обещал поддержку и уговорил меня. Потом я пообщался с некоторыми сотрудниками лаборатории, которых я знал по физико-техническому факультету УПИ им. С.М. Кирова, почти половина из них были выпускники нашей кафедры, которую в мои

студенческие годы возглавлял Георгий Викторович Скроцкий – основоположник ЯМР- и ЭПР-спектроскопии на Урале. Они к этой идее отнеслись не отрицательно. И я согласился. Потом как-то всё затихло, разговоры на эту тему прекратились, я успокоился.

Однако 8 марта 1991 г. (8 марта было ещё рабочим днем) в комнату, где я сидел, в отдел теоретической физики зашёл директор Института В.Е. Щербинин и сказал, что он принял решение назначить меня заведующим лабораторией кинетических явлений, и это произойдёт в апреле-месяце. Я сказал, чтобы только не с 1-го апреля. Он засмеялся и подписал приказ о моём назначении именно



Профессор А.П.Танкеев руководил лабораторией кинетических явлений с 1991 по 2013 г.

с 1-го апреля 1991 г. И с этой самой даты до 1 ноября 2013 г. (более 22-х лет) я руководил лабораторией кинетических явлений. Потом я узнал, что первым мою кандидатуру на должность заведующего лабораторией кинетических явлений предложил директору заведующий лабораторией низких температур доктор физико-математических наук Владимир Ермолаевич Старцев.

Несмотря на трудности последних лет наша лаборатория успешно работает: пришла молодёжь, сейчас лаборатория насчитывает уже 27 сотрудников.

История развития экспериментальных методов

Прогресс в экспериментальных исследованиях в рамках всех научных направлений тесно связан с развитием в Институте (и лаборатории) таких локальных экспериментальных методов, как ЯМР, ЭПР, гамма-резонанс.

Развитие метода ЯМР в Институте и лаборатории кинетических явлений

(из воспоминаний к.ф.-м.н. Бориса Алексеевича Алексашина)

Развитие метода ЯМР в Институте началось в лаборатории излучений по инициативе Сергея Васильевича Вонсовского и Павла Акимовича Халилеева при полном одобрении и поддержке Абрама Константиновича Кикоина, который в 60-е годы прошлого века был руководителем этой лаборатории. Создавать первый спектрометр ЯМР было поручено Борису Алексеевичу Алексашину, который пришёл на работу в Институт в лабораторию излучений в 1964 г. после окончания физико-технического факультета УПИ. За год работы ему удалось на базе отечественного электромагнита (магнитное поле – до 10 кЭ) собрать простейший спектрометр и получить сигнал от протонов в армянском коньяке, что и было продемонстрировано П.А. Халилееву в 1965 г. Для дальнейшей работы был заказан отечественный спектрометр в г. Ленинграде в Специальном КБ аналитического приборостроения АН СССР. Спектрометр получен в 1967 г. и размещён в подвале самого первого здания Института (позже – 4 корпус). Ко времени запуска прибора в команду запускающих было уже пять человек: закончивший дипломирование в лаборатории механических свойств нашего Института выпускник физтеха Прядеин Виталий Иванович – отличный радио-электронщик и человек, хорошо знакомый с явлением магнитного резонанса, пришедший по распределению; выпускник физтеха того же 1967 г. Соловьев Сергей Владимирович – специалист по программированию; ещё студент-дипломник физтеха Кузема Владимир, а также сотрудники лаборатории «Излучений» Валентин Суэтин и Б.А. Алексашин. Следует отметить, что перед запуском в подвальном помещении силами самих сотрудни-

ков сделан капитальный ремонт. Прибор был запущен успешно, но часть «неделок» исправлялась до 1972 г.

В этом же году по инициативе П.С. Зырянова и А.П. Степанова и при всесторонней поддержке С.В. Вонсовского выделены средства на покупку импульсного спектрометра ЯМР фирмы «Bruker» SXP4-100. Для прибора нужно было построить отдельное здание с фундаментами под электромагниты. Курировал строительство Б.А. Алексагин. Здание успешно построено в 1973 г. В этом же году этот спектрометр был получен, и электромагниты установлены на фундаментах. В комплектацию прибора входили два электромагнита: с магнитными полями до 22 кЭ и 15 кЭ, соответственно.

История запуска этого спектрометра весьма интересна. Для запуска установки весной 1974 г. должны были приехать специалисты из западной Германии. Свердловск же в те годы был закрытым городом и иностранцы из недружественных стран (блока НАТО) во время «холодной» войны были нежелательными гостями. Таким образом, все работы по запуску прибора проходили под пристальным вниманием руководства Института, Первого отдела и иных структур. Не обошлось без ЧП. Так, при первом включении спектрометра все электронные блоки, включая питание электромагнита, оказались заблокированными, и немецкие специалисты собрались уже уезжать, что привело бы к непредсказуемым последствиям. В соответствии с жёстким распоряжением руководства института, сотрудники лаборатории Е.Ю. Медведев и А.М. Остерн целую ночь разбирались в причине блокировки, в результате часть западных электронных компонент заменили на отечественные аналоги и прибор к утру заработал.

Для работы со слабыми сигналами ЯМР необходимо обеспечить долговременное накопление спектров (многократное ска-

нирование спектра с последующим запоминанием информации в ячейки памяти ЭВМ). Для этой цели нужно было иметь управляющий компьютер (в те годы – ДЗ-28), блок связи этого компьютера с блоками спектрометра и управляющую программу. Для создания этого комплекса в лаборатории создали группу автоматизации под руководством к.ф.-м.н. Медведева Евгения Юрьевича, которая с 1983 по 1997 г. была оформлена как самостоятельное подразделение в рамках Института. В результате продуктивной работы этой группы были автоматизированы все ЯМР-спектрометры лаборатории, разработан сверхчувствительный магнитометр ЯМР [4], со-



Евгений Юрьевич Медведев (к.ф.-м.н.) на фоне установки по измерению магнитной восприимчивости



Сотрудники лаборатории кинетических явлений (и лаборатории магнитомягких материалов) у отдельного пристроя «Брукер» к 4 корпусу Института. Слева направо стоят: Адольф Петрович Степанов, Юрий Геннадиевич Черепанов, Владислав Павлович Лаврентьев, Юрий Владимирович Пискунов, Алексей Михайлович Богданович (лаб. ферромагнитных сплавов), Анатолий Петрович Танкеев, Вадим Вячеславович Сериков (лаб. ферромагнитных сплавов), Александр Павлович Геращенко, Станислав Владиславович Верховский, Борис Алексеевич Алексагин, Юрий Иванович Жданов

здана автоматизированная установка для измерения магнитной восприимчивости [5]. В дальнейшем были автоматизированы все спектрометры гамма-резонанса как в лаборатории, так и в Институте.

В 90-е годы, когда появились первые персональные компьютеры, в лаборатории были разработаны программы для моделирования спектров ЯМР широких линий. Сначала этим занимался Юрий Иванович Жданов, затем (и в настоящее время) – к.ф.-м.н. Александр Павлович Геращенко. Им создан целый комплекс расчётных и управляющих программ, которыми пользуются все сотрудники лаборатории и ряд наших коллег из ИФМ и других научных организаций как в нашей стране, так и за рубежом.

В 1989 г., когда лаборатории были выделены целевые средства на исследования высокотемпературных сверхпроводников методами ЯМР, был приобретён сверхпроводящий соленоид на 9 Тл фирмы Oxford. На основе этого соленоида был собран еще один импульсный спектрометр ЯМР.

В настоящее время лаборатория использует линейку из трёх импульсных спектрометров ЯМР [6].



Группа сотрудников лаборатории в пристроен "Брукер" на фоне сверхпроводящего соленоида с магнитным полем ~ 9 Тл. Справа – налево стоят: К.Н. Михалев, С.В. Верховский, А. Г. Смольников, А.Ф. Садыков, З.Н. Волкова, Ю.В. Пискунов, А.П. Герашенко

История развития метода мёссбауэровской спектроскопии в ИФМ

(из воспоминаний д.ф.-м.н. В.А. Шабашова)

В 1961 г. физику Рудольфу Мёссбауэру, специалисту в физике атомного ядра и элементарных частиц, была присуждена Нобелевская премия «за исследование резонансного поглощения гамма-излучения и открытие в этой связи эффекта, носящего его имя». В Советском Союзе первая группа была организована в Москве, в Институте Атомной Энергии им. Курчатова. На Урале группу решили создать в Институте Физики Металлов, в лаборатории излучений в 1963 г.

Лабораторией излучений в то время руководил Абрам Константинович Кикоин (брат академика Исаака Константиновича Кикоина, заместителя директора ИАЭ, чьи научные достижения в атомном проекте были отмечены Ленинской премией и шестью Государственными премиями). В конце 50-х – начале 60-х годов И.К. Кикоин заведовал отделом института атомной энергии, затем стал зам. директора. Он заинтересовался общей теорией эффекта Мёссбауэра и организовал в своём отделе группу, развивающую это направление. В свою очередь его брат А.К. Кикоин решил организовать группу на Урале.

По инициативе А.К. Кикоина в ИАЭ были направлены два талантливых студента УрГУ – И.А. Дубовцев и Г. Угодников, с целью преддипломной практики и изучения эффекта Мёссбауэра. После защиты дипломов в Москве И. Дубовцев и Г. Угодников приехали в лабораторию излучений, где была организована группа мёссбауэровской спектроскопии, в состав которой кроме них вошли Нина Ивановна Филиппова и Евгений Евгеньевич Юрчиков. Это был конец 1963 – начало 1964 г.

Первые мёссбауэровские установки для ИФМ (с механическим и электродинамическим приводами) были сделаны на экспериментальной базе ИАЭ. Одной из самых сложных проблем тогда было отсутствие готовых источников излучения ^{57}Co . Активность получали в виде радиоактивных растворов, которые электролитически наносились на нужные для эксперимента подложки (хром или нержавеющая сталь и др.), а затем отжигались в печи. Делалось это в основном Юрчиковым и Дубовцевым. В дальнейшем мёссбауэровские источники делал в лаборатории диффузии В.В. Кайгородов.

Год спустя после организации группы, под руководством Е.Е. Юрчикова в неё пришли выпускники Физтеха УПИ Евгений Петрович Елсуков и Валерий Александрович Цурин. Вот так и сложился костяк группы.

К этому времени в институт вернулся П.А. Халилеев, д.т.н., лауреат Сталинской и Ленинской премий, который с 1947 по 1962 г. работал по закрытым проектам с И.К. Кикоиным в Верх-Нейвинске. Он стал руководителем группы ЯМР и ЯГР в лаборатории излучений.

В 1969 г. возникла новая волна преобразований. Кикоины попали в опалу. Е. Юрчиков защитил кандидатскую диссертацию. Группа вместе с оборудованием вошла в новую лабораторию кинетических явлений. В 1970 году группа пополнилась новым аспирантом, (рук. П.С. Зырянов) выпускником физтеха УПИ В.А. Шабашовым.

Помимо научной работы в то время ИФМ жил довольно интересной общественной жизнью. Например, в институте частенько проходили «капустники», так как среди учёных много людей творческих и весёлых. Летом мы ходили на сплавы по уральским рекам или осваивали скалолазание. А.К. Кикоин, между прочим, был альпинистом и заведовал секцией альпинизма в УФАНе.

Кандидатами наук стали:

- в 1969 г. Е.Е. Юрчиков (рук. А.З. Меньшиков) по теме эффекта Мёссбауэра в инварных Fe–Ni сплавах;
- в начале 70-х годов И.А. Дубовцев (рук. П.С. Зырянов) по теме влияния на мёссбауэровские спектры магнитных и немагнитных материалов воздействия радиочастотного поля. В дальнейшем возглавил лабораторию мёссбауэровской спектроскопии в Ростове-на-Дону;
- в конце 70-х – начале 80-х годов В.А. Цурин (рук. А.З. Меньшиков) по теме магнитной структуры и атомного упорядочения Fe–Pd сплавов, Е.П. Елсуков (рук. Н.Е. Старцева) по теме магнитной структуры Fe–Si сплавов и В.А. Шабашов (рук. В.В. Сагарадзе) по теме структурно-фазовых переходов в Fe–Ni сплавах.

В 80-е годы руководителем группы гамма-резонанса в лаборатории кинетических явлений стал к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Валерий Александрович Цурин.

Часть ведущих специалистов потом ушла в другие лаборатории (В.А. Шабашов – в лабораторию механических свойств, Е.П. Елсу-



Валерий Александрович Цурин на фоне спектрометра гамма-резонанса

ков – в филиал Института в Ижевске). В последующем Е.П. Елсуков защитил докторскую диссертацию и руководил лабораторией и отделом в ФТИ УрО РАН (г. Ижевск). Позже он стал лауреатом Государственной премии и премии выдающихся учёных Урала имени академика В.Д. Садовского, был избран членом-корреспондентом РАН. В.А. Шабашов защитил докторскую диссертацию по теме локальной атомной структуры железосодержащих сплавов при интенсивных деформационных и радиационных воздействиях (лауреат премии выдающихся учёных Урала имени академика В.Д. Садовского).

Таким образом, гамма-резонанс сейчас развивается уже в четырёх лабораториях Института, включая лабораторию кинетических явлений: лаборатории диффузии, лаборатории механических свойств, лаборатории ферромагнитных сплавов (Вадим Вячеславович Сериков, Надежда Михайловна Клейнерман).

В.А.Цурин ушёл от нас в 2012 г. после тяжелой болезни. В настоящее время группой гамма-резонанса в лаборатории руководит к.ф.-м.н. Борис Юрьевич Голобородский.

Развитие метода ЭПР и первые результаты

(из воспоминаний Александра Владимировича Кобелева и Александра Алексеевича Романюхи)

Группа ЭПР в лаборатории кинетических явлений размещалась в подвале 4-го корпуса Института и состояла (первоначально) из старшего научного сотрудника В. Федорова и нескольких инженеров и аспирантов. Оборудование было достаточно хорошим для того времени – стационарный спектрометр ER9, производства фирмы «Карл Цейс» (Германия). Позже в группу пришёл А.А. Романюха, при активном участии которого и под его наблюдением были приобретены и освоены новые установки: немецкий спектрометр ERS230, установка вакуумного напыления УВН и др. Окончив аспирантуру в ФИАНе по теории импеданса в металлах, А.В. Кобелев тоже стал участвовать в этой работе.

Начиналось все это с предложенной А.П. Степановым тематики исследования двухслойных микронной толщины металлических пленок Fe/Li, в которых интерес представляла проблема обменной связи слоёв металлов через взаимодействие электронов проводимости Li и намагниченности железа. Позже эта тематика переросла в инициированное В.В. Устиновым исследование осо-

бенностей межслойного взаимодействия и неколлинеарного магнитного упорядочения в многослойных плёнках Fe/Cr, интенсивно изучавшихся тогда в связи с гигантским магнетосопротивлением.

В это же время, благодаря плодотворному поиску и выполнению хозяйственных договоров, мы начали сотрудничество с НИИ Автоматики, который располагался в доме промышленности и справедливо считался «гнездом» советского ракетостроения. Они занимались глубоким и подробным изучением такого изумительного магнетика как железо-иттриевый феррит-гранат (ЖИГ), модификацией его магнитных свойств с помощью допирования и создания на его основе технологии и устройств хранения и обработки информации, использующих в качестве носителей цилиндрические магнитные домены.

Этот тип магнитной памяти очень устойчив к радиации, вибрационным нагрузкам и ударам и не требует электропитания для длительного хранения информации. Однако возникла существенная проблема – очень высокий процент брака, > 90 %. Поэтому они обратились в ИФМ за помощью. Были испробованы разные методы анализа проблемы, но всё как-то не получалось. В 1986 г. по предложению с.н.с. лаборатории низких температур ИФМ Александра Николаевича Черепанова они обратились к А.А. Романюхе попробовать методику ферромагнитного резонанса (ФМР). Сначала был небольшой хозяйственный договор на полгода (на 50 тысяч рублей) с задачей изучить проблему и сделать литературный обзор. Предложено провести сравнительное исследование забракованных и качественных плёнок. В ходе этой работы было обнаружено, что бракованные плёнки имеют более широкую линию ФМР. Выполнение следующего этапа позволило оптимизировать технологию выращивания плёнок и довести выход качественных изделий до 50 %. Это привело к экономическому эффекту в 3 млн. рублей, что по тем временам было очень много. Совет министров СССР подтвердил многомиллионный эффект и послал в ИФМ специальное письмо с благодарностью за эту работу.

Другим важным следствием этой работы стало многолетнее (более 5 лет) успешное сотрудничество между ИФМ и НПО Автоматики. Были получены фундаментальные результаты по ФМР в магнитных плёнках с разной анизотропией (в том числе, и в многослойных) и показано, что ширина линии ФМР определяет качество плёнок: чем меньше ширина линии, тем лучше плёнка. Нужно отметить, что группа ЭПР в это время не была даже премирована за многомиллионный экономический эффект.

О развитии теории кинетических явлений

(вспоминает И.Г. Кулеев)

Всё началось в 1967 г., когда я поступил в аспирантуру ИФМ к П.С. Зырянову, и мне была поставлена задача рассчитать эффекта Холла в квантующем магнитном поле для металлов и по-

лупроводников и исследовать осцилляции Шубникова-де Гааза. После защиты кандидатской диссертации 1970 г. по предложению П.С. Зырянова («Кулеев, ты любишь решать сложные задачи») я совместно с В.В. Кондратьевым занялся структурными фазовыми переходами и проблемой устойчивости решёток. После трагической гибели П.С. Зырянова в 1974 г. я вместе с аспирантом С.Г. Новокшеновым вернулся к исследованию гальваномагнитных явлений в полуметаллах и полупроводниках в квантующем магнитном поле. Были исследованы магнетофононные осцилляции эффекта Холла и объяснена большая совокупность экспериментальных данных по гальваномагнитным эффектам в квантующих магнитных полях. Этот материал лёг в основу диссертации Сергея Геннадьевича Новокшенова. Затем мной были исследованы особенности эффекта Кондо в разбавленных магнитных сплавах в квантующем магнитном поле. Выяснена роль кондовских особенностей в формировании квантовых осцилляций поперечного и продольного магнетосопротивления. Далее по настоянию А.П. Степанова мне пришлось заняться экспериментальной тематикой лаборатории. Совместно с Владимиром Васильевичем Кондратьевым и Александром Владимировичем Скриповым были изучены особенности структурных фазовых переходов с образованием волн зарядовой плотности в слоистых дихалькогенидах переходных металлов. Проанализирована структура низкотемпературных фаз и исследована их устойчивость. В рамках принятой модели удалось объяснить экспериментальные данные по рассеянию рентгеновских лучей и ядерному магнитному резонансу.

В начале 90-х г. прошлого века образовалась сильная творческая группа академик И.М. Цидильковский, И.И. Ляпилин и И.Г. Кулеев. Совместно с экспериментаторами лаборатории полупроводников (Л.Д. Сабирзяновой, А.Т. Лончаковым) были проанализированы особенности термогальваномагнитных явлений в бесщелевых полупроводниках, содержащих примеси железа со смешанной валентностью. Объяснён ряд экспериментально наблюдаемых аномалий в кристаллах HgSe:Fe : подвижности электронов, термоэдс, продольного и поперечного эффектов Нернста-Эттинггаузена в зависимости от температуры и концентрации примесей, обусловленных пространственным упорядочением зарядов в системе ионов железа со смешанной валентностью. В этих работах принимала участие Ирина Юрьевна Арапова, которая защитила кандидатскую диссертацию в 2000 г. Но ничто не вечно под луной, в том числе и академик И.М. Цидильковский (1998 г.). В 1997–2002 гг. был разработан метод решения системы кинетических уравнений для неравновесных электрон-фононных систем с учётом взаимного увлечения электронов и фононов, а также нормальных процессов электрон-электронного и фонон-фононного рассеяний. В рамках этого метода вычислены кинетические коэффициенты проводников с вырожденной статистикой носите-

лей тока. Проанализирована роль взаимного увлечения электронов и фононов, а также нормальных процессов рассеяния квазичастиц в электросопротивлении, термоэдс и теплопроводности проводников. В этих работах принимал участие Иван Игоревич Кулеев. По материалам последних двух пунктов мной в 2002 г. была защищена докторская диссертация.

Затем совместно с И.И. Кулеевым исследована роль изотопического беспорядка в формировании кинетических свойств высокообогащённых полупроводниковых кристаллов германия и кремния. Рассмотрено влияние изотопического беспорядка на поглощение ультразвука в кристаллах германия, кремния и алмаза при низких температурах. Предсказан «гигантский» изотопический эффект в поглощении ультразвука в этих кристаллах. В 2005 г. И.И. Кулеевым была защищена кандидатская диссертация.

В 2008–2012 гг. совместно с И.И. Кулеевым исследованы механизмы релаксации квазипоперечных фононов и поглощения ультразвука в ангармонических процессах рассеяния в кубических кристаллах. Изучено влияние затухания фононных состояний на анизотропию поглощения ультразвука в ангармонических процессах рассеяния в кубических кристаллах Ge , Si , InSb , MgO , KCl .

В 2013–2017 гг. совместно с И.И. Кулеевым и Сергеем Михайловичем Бахаревым была исследована фокусировка фононов и фононный транспорт в монокристаллических наноструктурах. Использование предложенного метода и вычисленных нами времён релаксации фононов позволило адекватно описать температурные зависимости теплопроводности кристаллов кремния с квадратным и прямоугольным сечениями и объяснить оба эффекта в теплопроводности, обнаруженные в работе МакКарди. Исследовано влияние анизотропии упругой энергии на фононный транспорт в монокристаллических плёнках и нанопроводах в режиме кнудсеновского течения фононного газа. Рассмотрено влияние фокусировки на распространение фононов и теплопроводность плёнок с различным типом анизотропии упругой энергии. Показано, что максимальной теплопроводностью обладают плёнки Si с ориентацией $\{100\}$, а минимальной теплопроводностью – плёнки с ориентацией $\{111\}$.

В 2016 г. по материалам последнего пункта С.М. Бахаревым защищена кандидатская диссертация. Готовится к публикации монография «Фокусировка фононов и фононный транспорт в монокристаллических наноструктурах.»



Главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., Игорь Гайнитдинович Кулеев за работой

Исследование гидридов методами ЯМР и нейтронной спектроскопии

(из воспоминаний д.ф.-м.н., главного научного сотрудника
Александра Владимировича Скрипова)

Первые эксперименты по изучению систем металл-водород методом ЯМР были проведены в лаборатории в конце 70-х годов по инициативе Адольфа Петровича Степанова. Эксперименты проводились на ряде гидридов редкоземельных металлов. Однако эти системы оказались не слишком удобными объектами для исследования с помощью ЯМР. Следующий этап начался в 1982 г., когда по предложению А.В. Скрипова стартовали исследования гидрированных фаз Лавеса. Первая статья по данной тематике была опубликована в 1983 г. в журнале «Solid State Communications» [7]. Фазы Лавеса с водородом оказались исключительно интересным классом соединений с точки зрения индуцированных водородом изменений их электронных свойств, фазовых переходов и уникальных особенностей диффузионного движения водорода (две частотные шкалы атомных перескоков). Исследование свойств гидридов фаз Лавеса и некоторых родственных интерметаллических соединений легло в основу кандидатских диссертаций сотрудников лаборатории Михаила Юрьевича Беляева (1987 г.), Светланы Васильевны Рычковой (1992 г.), Дениса Сергеевича Сибирцева (1998 г.), Алексея Викторовича Солонина (2002 г.) и Антона Леонидовича Бузлукова (2004 г.). Начиная с 1995 г. в качестве метода, дополняющего результаты ЯМР-экспериментов по изучению подвижности водорода в гидридах фаз Лавеса, стало применяться квазиупругое рассеяние нейтронов. Соответствующие эксперименты проводились А.В. Скриповым

в ряде международных нейтронных центров. Результаты этих комплексных исследований были обобщены в докторской диссертации А.В. Скрипова (1998 г.).

С 2007 г. в лаборатории начались исследования атомного движения в комплексных гидридах – перспективных системах для хранения водорода. Особенностью этих систем является сосуществование реориентационного движения комплексных анионов и трансляционной диффузии катионов и комплексных анионов. Первая статья по данной тематике была опубликована в 2008 г. в журнале «Journal of Physical Chemistry C» [8]. Благодаря взрывному росту



Александр Владимирович Скрипов, Адольф Петрович Степанов и Алексей Викторович Солонин (справа – налево) у импульсного спектрометра ЯМР SXP4 -100

интереса к свойствам комплексных гидридов во всем мире, проведенные в лаборатории работы в этом направлении отличаются высоким уровнем цитирования. Исследование атомного движения в комплексных гидридах методом ЯМР легло в основу кандидатских диссертаций сотрудников лаборатории Ольги Анатольевны Бабановой (2012 г.) и Романа Валерьевича Скорюнова (2017 г.). Развитие этого направления привело к обнаружению в 2014 г. исключительно высокой ионной проводимости в одном из классов комплексных гидридов – клозо-боратах щелочных металлов [9].

Исследования электронной и кристаллической структуры сверхпроводников

Значительная часть сотрудников Института в 70-е годы XX в. занимались исследованием сверхпроводящих соединений. В основном это были соединения на основе переходных металлов со структурой A-15 (в то время – рекордсмены по T_c), C-15 и др. Научная проблематика этого направления подробно освещена в [10].

Эти исследования проводились и в нашей лаборатории. Дело в том, что одним из основных параметров, определяющих температуру сверхпроводящего перехода (T_c) в модели Бардина-Купера-Шриффера (БКШ) является плотность электронных состояний на уровне Ферми ($N(E_F)$) [10]. Анализируя эволюцию формы линии ЯМР на ядре переходного элемента при изменении температуры (при переходе в сверхпроводящее состояние), можно выделить вклад в сдвиг линии, связанный с электронами проводимости (сдвиг Найта) [11], который пропорционален $N(E_F)$. В некоторых случаях удавалось получить данные о парциальных плотностях электронных состояний разного типа вблизи уровня Ферми. Это направление исследований интенсивно развивалось, результаты этой деятельности были обобщены в нескольких кандидатских диссертациях по исследованию сверхпроводящих соединений со структурой A15 (V_3Si , V_3Ga , ...) методом ЯМР: в 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию С.В. Верховский, в 1982 г. – А.В. Скрипов, а в 1984 г. – Б.А. Алексахин. В этих работах детально исследованы основные сверхпроводящие соединения со структурой A-15, изучалось также влияние различного рода беспорядка как композиционного, так и структурного на сверхпроводящие свойства этих соединений.

С 80-х годов прошлого века по инициативе Станислава Владиславовича Верховского стартовали исследования методом ЯМР сверхпроводящих соединений со структурой фаз Шувреля ($MeMo_6X_8$, $Me = Cu, Sn, Pb$; $X = S, Se$). Эти соединения характеризовались достаточно высокими температурами сверхпроводящего перехода (до 14 К) и очень высоким значением второго критического поля (до 20 Т). Эксперимент усложнялся тем, что природное содержание изотопов, ядра которых обладали магнитным

моментом, было достаточно низким: ^{95}Mo – 15,7 %, ^{119}Sn – 8,6 %, ^{33}S – 0,76 %. С другой стороны, ядра ^{95}Mo характеризовались ещё и низким гирромагнитным отношением, т.е. были «плохими» с точки зрения ЯМР. В это время в Институте физических проблем (г. Москва) по инициативе Николая Евгеньевича Алексеевского (чл.- корр. АН СССР, руководитель лаборатории низких температур) синтезировали уникальный поликристаллический образец SnMo_6S_8 с изотопным обогащением по всем элементам (включая серу, специально для ЯМР). В результате тесной кооперации с Н.Е. Алексеевским выполнена интересная работа [12]. Это был первый в лаборатории опыт работы с изотопно-обогащёнными соединениями и начало плодотворного сотрудничества с Институтом физических проблем (Е.Г. Николаев, Н.Е. Алексеевский). Результаты исследований сверхпроводящих фаз Шевреля методами ЯМР обобщены в кандидатской диссертации Константина Николаевича Михалева, защищённой в 1987 г.

В 1986 г. К.А. Muller и J.G. Bednorz открыли высокотемпературную сверхпроводимость. Это открытие породило огромный интерес и целую лавину работ в этой области. Как только первые образцы сверхпроводящих керамик, синтезированные в соседнем Институте химии твёрдого тела нашими коллегами (В.Л. Кожевниковым и др.), попали в наш Институт, в лаборатории было развёрнуто их экспериментальное исследование методами ЯМР и ЭПР. В первых экспериментах в сверхпроводниках $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ($T_c \sim 38$ К) и $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ($T_c \sim 90$ К) из анализа измеренных температурных зависимостей скоростей спин-решёточной релаксации в сверхпроводящем состоянии были получены значения сверхпроводящей щели. Эти результаты позволили еще в 90-х годах прошлого века предположить, что классический электрон-фононный механизм (модель БКШ) не работает в новых оксидных сверхпроводниках с аномально-высокими значениями T_c (больше 90 К). Дальнейшее исследование привело к созданию новых моделей (модель ММР и др.), синтезу и исследованию слоистых многокомпонентных оксидов на основе меди со значительно большими значениями критических температур ($\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$, $T_c \sim 120$ К). Во многих случаях решающую роль в апробации теоретических моделей ВТСП играли ЯМР-эксперименты. Значительная часть этих пионерских работ выполнена в нашей лаборатории в тесном сотрудничестве с ведущими научными центрами СССР (в 80–90-е годы прошлого века), Европы (Германия, Университет Штуттгарта, профессор М. Меринг; Франция, Париж, Высшая школа промышленной физики и химии, проф. А. Трокинер), Японии (Саппоро, университет Хоккайдо, проф. К. Кумагаи), позже, уже в XXI в. – в США, Айова, Эймс, Университет Айовы, проф. Ю. Фурукава).

В процессе этой деятельности было много забавных происшествий. Однажды в суровые 90-е годы прошлого века, когда Советский Союз уже перестал существовать, к нам в гости для со-

вместной экспериментальной работы в рамках этого направления приехал аспирант Норберт Винзек из Штуттгарта (Германия). Часть экспериментов была запланирована на низкотемпературной ячейке электромагнита в здании – пристрое «Брукер». Жидкий азот для охлаждения ячейки поступал из большого азотного транспортного дьюара при включении нагревателя внутри этого сосуда. Однажды выходное отверстие забило и большой фланец-пробка вылетел из дьюара с полной имитацией взрыва. Наши сотрудники побежали к электромагниту – ликвидировать последствия, а немец мгновенно упал на пол, ногами к взрыву, а голову прикрыл руками. Позже он объяснил, что так его учили в Бундесвере (он проходил обязательную службу в армии). Нужно отметить, что Норберт через год успешно защитил в Германии диссертацию. Руководителем его был очень известный в ЯМР-сообществе профессор М. Меринг (один из директоров Штуттгартского университета).

Норберт Винзек привёз с собой оригинальную управляющую программу для импульсных спектрометров ЯМР, разработанную в Штуттгартском университете. Программа называлась «PILS» (одна из марок популярного в те годы в Германии пива). Работавший тогда в лаборатории м.н.с. Владислав Лаврентьев (закончивший ранее РТФ УПИ) адаптировал эту программу для нашего спектрометра. В это время в лаборатории только появились первые персональные компьютеры и этот вариант программы долго и успешно работал на двух импульсных спектрометрах. Позже к.ф.-м.н. Александр Геращенко разработал более совершенную версию управляющей программы для последующих версий Windows (NT, XP, ...) и назвал ее вполне созвучно: «Winpulse»

Часть результатов по исследованию высокотемпературных сверхпроводников была обобщена в докторской диссертации К.Н. Михалева, которая была защищена в 2009 г.

Исходными (недопированными) соединениями у большинства высокотемпературных сверхпроводников являются магнитоупорядоченные оксиды – двумерные гейзенберговские антиферромагнетики (La_2CuO_4 , $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$, ...). Исследование этих соединений началось в нашей лаборатории в конце прошлого века – начале нынешнего [13], в результате был приобретён ценный опыт работы с аномально широкими линиями ЯМР в локальном поле на ядрах магнитных ионов. Этот опыт пригодился в дальнейшем при исследовании других магнитных оксидов с колоссальным магнитосопротивлением – манганитов [14].

Заключение

В последние годы в нашей лаборатории с помощью методов спектроскопии ядерного магнитного резонанса и ядерного гамма-резонанса получили дальнейшее развитие интенсивные исследования в области физики конденсированного состояния по следующим основным направлениям:

- электронное строение и структура сверхпроводящих материалов;
- диффузия водорода и дейтерия в металлических материалах (включая вещества в нанокристаллическом состоянии), перспективных для задач «малой» энергетики;
- подвижность носителей тока в перспективных суперионных материалах;
- спиновая динамика и процессы зарядового и орбитального упорядочения в магнитных оксидах и родственными им по структуре магнитоупорядоченных соединениях;
- структура ближнего магнитного и зарядового порядка в областях фазовой неустойчивости сильнокоррелированных материалов пониженной размерности;
- электронное строение, магнитные свойства и структурный полиморфизм сплавов и соединений на основе актинидов;
- теоретические исследования в области нелинейной физики магнитных явлений и ЯМР-спектроскопии.

Следует отметить, что наряду с основными направлениями, сотрудники лаборатории активно работают с коллегами из других институтов в рамках других тем, в том числе по ряду проблем в биофизике (продолжая славные традиции основателя лаборатории П.С. Зырянова). Примером этому является не так давно изданная монография А.В. Кобелева [15].

Все направления деятельности лаборатории имеют хорошую экспертизу как международную, так и отечественную и поддерживаются соответствующими отечественными и международными грантами. Исследования в области ЯМР ведутся в тесном сотрудничестве с Институтами УрО РАН (Институт химии твёрдого тела, Институт высокотемпературной электрохимии), СО РАН (Институт катализа им. Г.К. Борескова) и другими научными центрами: РНЦ «Курчатовский Институт», РФЯЦ – ВНИИТФ им. акад. Е.И. Заббахина. Соглашения о научном сотрудничестве с крупными зарубежными научными центрами, такими как университет Хоккайдо (Япония), Институт химической физики Университета земли Саар (Германия), Высшая школа промышленной физики и химии г. Парижа (Франция) и Лаборатория физики твёрдого тела CNRS (Франция), Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса (США) дали возможность использовать взаимно дополняющие возможности научного оборудования центров при постановке уникальных исследований электронного строения и структурных особенностей перспективных материалов методами ЯМР. На настоящий момент сотрудниками лаборатории накоплен опыт работы с соединениями, разнообразие элементного состава которых включает в себя более 50 элементов периодической системы Д.И. Менделеева. Коллектив лаборатории активно привлекает к исследовательской деятельности студентов, бакалавров и магистров физических и физико-технических специальностей УрФУ.



Сотрудники лаборатории кинетических явлений, слева-направо (верхние ряды, стоят): Голобородский Борис Юрьевич, Скрипов Александр Владимирович, Пискунов Юрий Владимирович, Кулеев Иван Игоревич, Герашенко Александр Павлович, Танкеев Анатолий Петрович, Бузуков Антон Леонидович, Кобелев Александр Владимирович, Оглобличев Василий Владимирович, Солонинин Алексей Викторович, Михалев Константин Николаевич, Борич Михаил Александрович, Садыков Алмаз Фаритович, Смагин Валерий Владимирович, Смольникоа Алексей Геннадьевич. Нижний ряд, справа-налево (сидят): Бахарев Сергей Михайлович, Кононихина Вера Владимировна, Бабанова Ольга Анатольевна, Арапова Ирина Юрьевна, Кулеев Игорь Гайнитдинович

Это и не удивительно, так как значительная часть сотрудников лаборатории параллельно с основной работой читали лекции студентам сначала в УПИ им. С.М. Кирова, УрГУ им. А.М. Горького, в настоящее время – в УрФУ. Вот далеко не полный список наших доцентов и профессоров: П.С. Зырянов, А.П. Степанов, А.П. Танкеев (преполагает с 70-х годов прошлого века до наших дней, прочитал все курсы теоретической физики и часть курсов высшей математики, создал базовую кафедру в Институте), Е.Ю. Медведев, В.И. Окулов, А.В. Скрипов, К.Н. Михалев, М.А. Борич, А.П. Герашенко, И.И. Кулеев.

Почти каждый год в лаборатории кто-нибудь из наших молодых коллег защищает кандидатскую диссертацию. В этом году (2017) это – м.н.с. Скорюнов Роман Валерьевич, получивший за активную работу престижную стипендию имени П.С. Зырянова (воистину – связь поколений!). Другая сотрудница лаборатории, к.ф.-м.н. Ольга Анатольевна Бабанова, ранее (в 2010 г.) также получила стипендию имени П.С. Зырянова, в 2013 г. – премию губернатора области за лучшую работу в области экспериментальной физики, а недавно (в 2015 г.) за успехи в научной деятельности получила – международную премию L'Oreal-UNESCO «Женщины в науке».

Важно отметить, что лаборатория с момента образования была «кузницей» кадров для Института. Из стен лаборатории выш-



Молодые сотрудники О.А. Бабанова и Р.В. Скорюнов на фоне импульсного спектрометра ЯМР SXP4-100

ли: пять заведующих лабораторий, два заведующих отделов Института, три заместителя директора Института (Г.Г. Талуц, В.В. Устинов, И.Ю. Арапова), директор Института (Владимир Васильевич Устинов). Из бывших сотрудников лаборатории один стал членом-корреспондентом РАН (Е.П. Елсуков), ещё один – академиком РАН (В.В. Устинов). Работавший в лаборатории Кацнельсон Михаил Иосифович, автор нескольких монографий, получил к настоящему времени

несколько престижных премий за выдающиеся работы в области теоретической физики: премии Спинозы (2013 г.) и г. Гамбурга (специально для теоретиков, в 2016 г.).

К.Н. Михалев

Список литературы

1. Проблемы физики твёрдого тела, Под ред. В.П. Силина. Изд-во УНЦ АН СССР, Свердловск (1975), 212 с.
2. Б.Н. Филиппов, в кн. Физика металлов на Урале. История Института физики металлов в лицах, РИО УрО РАН, Екатеринбург (2012), С.176.
3. Исследования по физике кинетических явлений, Под ред. Г.Г. Талуца, Изд-во УНЦ АН СССР, Свердловск (1984), 127 с.
4. Е.Ю. Медведев, Ю.И. Дерябин, ПТЭ, № 6, 72 (2008).
5. Е.Ю. Медведев, Ю.И. Дерябин, И.П. Омельков, С.В. Верховский, Б.А. Алексагин, К.Н. Михалев, ПТЭ, № 4, 242 (1988).
6. Официальный сайт ИФМ УрО РАН (www.imr.uran.ru), отдел наноспинтроники, лаборатория кинетических явлений.
7. M.Yu. Belyaev, A.V. Skripov, V.N. Kozhanov, A.P. Stepanov, E.V. Galoshina, Solid State Commun. **48**, 1049 (1983).
8. A.V. Skripov, A.V. Soloninin, Y. Filinchuk, D. Chernyshov, J. Phys. Chem. C **112**, 18701 (2008).
9. T.J. Udovic, M. Matsuo, A. Unemoto, N. Verdal, V. Stavila, A.V. Skripov, J.J. Rush, H. Takamura, S. Orimo, Chem. Comm. **50**, 3750 (2014).
10. С.В. Вонсовский, Ю.А. Изюмов, Э.З. Курмаев, *Сверхпроводимость переходных металлов, их сплавов и соединений*, Наука, Москва (1977), 383с.
11. Ж. Винтер, *Магнитный резонанс в металлах*, Мир, Москва (1976), 288 с.
12. Н.Е. Алексеевский, К.Н. Михалев, С.В. Верховский и др., ЖЭТФ **91**, 677 (1986).
13. K. Mikhalev, S. Verkhovskii, A. Gerashenko, A. Mirmelstein, V. Bobrovskii, K. Kumagai, Y. Furukawa, T. D'yachkova, Yu. Zainulin, Phys. Rev. B. **69**, 132415 (2004).
14. К.Н. Михалев, З.Н. Волкова, А.П. Геращенко, ФММ **115**, 1204 (2014).
15. А.В. Кобелев, Л.Т. Смолюк, Р.М. Кобелева, Ю.Л. Проценко, *Нелинейные вязкоупругие свойства биологических тканей*, РИО УрО РАН, Екатеринбург (2012), 216 с.

ЛАБОРАТОРИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Сухоруков Юрий Петрович, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.
- Автомонова Татьяна Степановна, старший лаборант
- Арбузова Тамара Ивановна старший, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Бессонов Владимир Дмитриевич, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Бессонова Валентина Анатольевна, младший научный сотрудник
- Бучкевич Андрей Александрович, инженер-исследователь
- Виглин Николай Альфредович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Гижевский Борис Александрович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Мостовщикова Елена Викторовна, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Наумов Сергей Владимирович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Павлов Тимофей Николаевич, ведущий электроник
- Солин Николай Иванович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Телегин Сергей Владимирович, младший научный сотрудник
- Цвелиховская Вера Михайловна, ведущий электроник
- Чеботаев Николай Михайлович, старший инженер, к.ф.-м.н.

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ МАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Официально лаборатория магнитных полупроводников была создана в ИФМ УНЦ АН СССР 5 октября 1972 г. Её возглавил доктор физико-математических наук Алексей Андреевич Самохвалов. Однако история лаборатории началась существенно раньше, с момента создания Алексеем Андреевичем группы ферритов в 1964 г. по инициативе академика АН СССР Сергея Васильевича Вонсовского. В состав группы вошли Маргарита Ивановна Симонова (синтез и кристаллическая структура твёрдых тел), Борис Викторович Карпенко (теория обменных взаимодействий в магнетиках), Александр Яковлевич Афанасьев (получение монокристаллов ферритов и электрические свойства) и Юрий Николаевич Морозов (магнитные свойства).

Группа исследовала энергетический спектр электронов проводимости при спиновом упорядочении и механизмы электропроводности ферримангнитного полупроводника магнетита. Были проведены исследования эффекта Холла, магнитосопротивления и гальваномагнитные свойства магнетита. Определение параметров носителей заряда в магнетите, учёт аномальных эффектов,



А.А. Самохвалов

М.И. Симонова

Б.В. Карпенко

А.Я. Афанасьев



Н.И. Солин

связанных со спиновым упорядочением, имели существенное значение для понимания механизма электропроводности ферритов. На основе поперечного эффекта Нернста-Эттингсгаузена была оценена температурная зависимость подвижности электронов проводимости в области магнитного упорядочения, обнаружены резкие аномалии и анизотропия эффекта в области низкотемпературного превращения (при 95 К), свидетельствующие об изменении энергетического спектра электронов проводимости в области фазового превращения магнетита [1]. Эти результаты заложили основу для изучения широкого класса магнитных материалов, обладающих низкой подвижностью носителей тока – ферритов-шпинелей и ферритов-гранатов, имеющих важное прикладное значение.



В.С. Бабушкин

С момента образования группы ферритов А.А. Самохвалов проводил оправдавшую себя с годами организацию работы группы: от технологии получения образцов, исследования комплекса физических свойств различными экспериментальными методиками до выяснения возможностей использования полученных результатов и разработки макетов прикладных устройств. Для реализации этой стратегии группа была существенно усилена талантливыми молодыми исследователями Тamarой Ивановной Арбузовой (магнитные свойства), Николаем Ивановичем Солиным и Василием Степановичем Бабушкиным (СВЧ свойства), Натальей Николаевной Лошкаревой (оптические и магнитооптические свойства), Борисом Александровичем Гижевским (электрические свойства), Николаем Михайловичем Чеботаевым (синтез монокристаллов). Девизом коллектива группы, а впоследствии и лаборатории, стала фраза А.А. Самохвалова – «Ни дня без эксперимента!».



Н.М. Чеботаев

Ферриты являются широко используемыми материалами в радиотехнике и электронике. Для расширения возможностей использования ферритов необходимо было глубокое понимание природы магнитных, электрических, оптических, высокочастотных свойств, выяснение механизмов электронной проводимости, изучение диэлектрической проницаемости в широкой области частот, влияния гидростатического давления на электрические свойства. Объектами исследований являлись ферриты-шпинели никель-цинковые, никель-железные, цинк-железные, магний-марганцевые, марганцевый и литиевый ферриты [2]. Одной из важных работ этого периода была работа по оптическим свойствам, посвящённая доказательству наличия механизма поляронной проводимости в ферритах [3]. Наиболее полно результаты экспериментальных и теоретических исследований ферритов были обобщены в обзоре «Электронная проводимость в магнетите и ферритах» [4] и в докторской диссертации А.А. Самохвалова – «Исследование обменного взаимодействия и электронной проводимости в некоторых магнитных оксидах» [5], защита которой состоялась в 1971 г.



Н.Н. Лошкарева

Начало шестидесятых годов ознаменовалось открытием ферромагнетизма редкоземельного оксида европия EuO с температурой Кюри $T_c=70$ К и намагниченностью насыщения $4\pi M_s=24\ 100$ Гс. Это был первый полупроводниковый редкоземельный ферромагнитный оксид, представляющий собой модельный Гейзенберговский ферромагнетик. По предложению академика С.В. Вонсовского в 1965 г. коллектив группы ферритов с энтузиазмом приступил к синтезу и исследованиям физических свойств монокристаллов, поликристаллов и твёрдых растворов на основе оксида европия [6,7]. Молодой по своему составу коллектив работал увлечённо. Активно проходили лабораторные семинары, на которых горячо обсуждались полученные результаты и свежие статьи исследовательских групп из ИВМ и МТИ, с которыми в то время шла острая конкуренция. За «Синтез и исследование новых ферромагнитных материалов на основе низшего оксида европия» группа ферритов в лице А.А. Самохвалова удостоена третьей премии в конкурсе Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева за 1970 г. Практически одновременно с созданием группы ферритов в Институте химии УНЦ АН СССР была организована группа по синтезу новых редкоземельных магнитных соединений, возглавляемая будущим директором Института и член-корреспондентом РАН Виталием Григорьевичем Бамбуровым. На протяжении долгих лет эти две группы, а впоследствии и лаборатории, связывала не только совместная активная научная деятельность, но и дружеские отношения между сотрудниками. С 1964 по 1972 г. группа ферритов плодотворно сотрудничала с прикладными институтами Минэлектронпрома СССР, в частности, НИИ «Домен».



Б.А. Гижевский

Накануне создания лаборатории сотрудники группы приняли активное участие в строительстве корпуса гидроэкструзии, в котором в последствие расположились основные исследовательские фонды. 5 октября 1972 г. был издан приказ по ИФМ УНЦ АН СССР № 362 о создании с 15 октября 1972 г. лаборатории магнитных полупроводников. После преобразования группы ферритов в лабораторию состав коллектива пополняется плеядой молодых сотрудников: Любовью Давыдовной Фальковской (теория твёрдого тела), Николаем Альфредовичем Виглиным (СВЧ и электрические явления), Галиной Константиновной Показаньевой (горячее прессование, электрические явления), Александром Феофановичем Гуничевым (оптические и магнитооптические свойства), Владимиром Васильевичем Осиповым (электрические явления), Ольгой Львовной Галаховой (Магат) (рентгеновские исследования), Михаилом Ивановичем Стародумовым (инженер), Юрием Петровичем Сухоруковым (оптические и магнитооптические свойства) и Маиной Сергеевной Костромитиной (старший лаборант).



Т.И. Арбузова

Понимая, что возможность использования гигантских эффектов в соединениях европия (изменение электросопротивления при пе-



Л.Д. Фальковская



В.В. Осипов



А.Ф. Гуничев



М.И. Стародумов



Ю.П. Сухоруков

реходе металл-изолятор достигает 13 порядков [818жузе], магнитооптический эффект Фарадея ~ 105 град/см при длине волны 1 мкм [9]) ограничивается относительно низкой температурой Кюри, А.А. Самохвалов ставит перед лабораторией основную цель – поиск способов повышения температуры Кюри. Частично коллектив с этой задачей справился. Впервые в СССР были выращены высококачественные монокристаллы EuO , в том числе легированные РЗ элементами. Температура Кюри была повышена до 130–150 К, что выше температуры жидкого азота. Была разработана оригинальная технология создания плёнок EuO , защищённая авторским свидетельством [10]. В монокристаллах EuO , легированных гадолинием, при комнатной температуре был обнаружен переход изолятор-металл: в зависимости от концентрации гадолиния электросопротивление меняется на колоссальную величину – на 11 порядков [11]; в твёрдых растворах EuS:Sm с полупроводниковой проводимостью происходит усиление обменного взаимодействия [7]. Из электрических и оптических измерений установлен зонный характер проводимости и определены параметры носителей заряда в монокристаллах нестехиометрического EuO и легированного ионами Gd^{3+} [12]. На нестехиометрических плёнках EuO из анализа данных по эффекту Фарадея, магнитных и транспортных свойств была показана магнитная гетерогенность, связанная с образованием магнитных примесных состояний [13]. Это были одни из первых работ по магнитным полупроводникам, в которых экспериментально было обнаружено электронное и магнитное разделение фаз. Плёнки EuO с повышенной температурой Кюри ($T_C=150$ К) оказались подходящим материалом для термомагнитной записи и считывания информации на основе эффекта Фарадея. На них совместно с ФИ АН СССР была осуществлена побитовая и голографическая запись информации с высокими характеристиками [14]. В совместной работе с филиалом МИФИ в Арзамасе (ныне г. Саров) были проведены уникальные магнитооптические эксперименты в сверхсильных магнитных полях. При исследовании эффекта Фарадея на плёнках EuO в мегагаусовых полях при комнатной температуре обнаружено удельное фарадеевское вращение, превышающее 10^7 град/см, которое связано с насыщением магнитного момента и расщеплением зоны проводимости на уровни Ландау [15]. В это же время создаются макеты устройств, использующих гигантский эффект Фарадея и гигантское магнитосопротивление окиси европия [16]. Выяснены механизмы уширения линии ферромагнитного резонанса, затухания спиновых и магнитостатических волн в магнитных полупроводниках EuO [17, 18].

Признание ведущей роли лаборатории в СССР в области изучения физических свойств магнитных полупроводников было подтверждено решением объединённого Научного совета

по проблеме «Физика и химия полупроводников» при Президиуме АН СССР в 1977 г., согласно которому Институт физики металлов определён головной организацией по физике магнитных полупроводников. Лаборатория являлась организатором Уральских зимних школ по физике и химии магнитных и редкоземельных полупроводников. Экспозиция ИФМ УНЦ АН СССР в 1981 г. на ВДНХ СССР на тему «Магнитные полупроводники – новые материалы для электронной техники» удостоена 4-х бронзовых медалей и диплома I степени. В 1984 г. заведующему лабораторией А.А. Самохвалову в соавторстве была присуждена Государственная премия СССР за цикл работ «Магнетизм и электронная структура редкоземельных и урановых соединений», опубликованных в 1959–1982 гг. От ИФМ УНЦ АН СССР в этом коллективе участвовал также Юрий Павлович Ирхин.

На рубеже 70–80 гг. деятельность лаборатории сосредоточивается на другом классе магнитных полупроводников – хромовых халькогенидных шпинелях CdCr_2Se_4 , CdCr_2S_4 и HgCr_2Se_4 . Магнитные хромхалькогенидные шпинели, в которых свободные носители заряда появляются при легировании или отжиге и имеют относительно высокую подвижность ($\sim 10^3$ см²/В·с), явились благодатным объектом для изучения взаимодействия электронной и магнитной подсистем. Кроме того, эти соединения обладали более высокой температурой Кюри по сравнению с EuO и можно было попытаться на их основе создать магнитные полупроводники с T_C выше комнатной температуры. Действительно, были синтезированы медная шпинель и твёрдые растворы $\text{Cu}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{Cr}_2\text{S}_4$ с высокой T_C , однако они обладали низкой подвижностью носителей заряда, что ограничивало их использование в полупроводниковых устройствах [19]. Результаты исследований физических свойств магнитных полупроводников были обобщены А.А. Самохваловым в книге «Редкоземельные полупроводники» [8].

Проблема сочетания комнатной T_C и высокой подвижности носителей заряда являлась главным препятствием в практических применениях классических магнитных полупроводников. В настоящее время эта тема развивается в исследованиях концентрированных и разбавленных магнитных полупроводников.

А.А. Самохвалов пополнял состав лаборатории новыми талантливыми сотрудниками. В восьмидесятых годах в лабораторию пришли Виктор Алексеевич Костылев (транспортные и магнитотранспортные свойства), Сергей Владимирович Наумов и Наталья Владимировна Костромитина (Жеребцова) (синтез кристаллов и рентгеновские исследования), Алексей Игоревич Трофимов (инженер), Нелли Александровна Морозова (транспортные свойства), Игорь Владимирович Кочев (инженер, ныне руководитель отдела криогенных технологий Центра коллективного пользования Института), Игорь Борисович Смоляк (магнит-



М.С. Костромитина



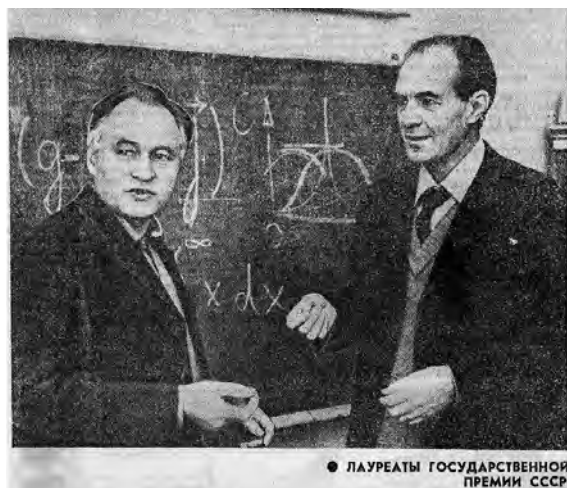
Г.К. Показаньева



Н.А. Виглин



О.Л. Галахова (Марат)



А.А. Самохвалов справа и Ю.П. Ирхин слева – лауреаты Государственной премии СССР за 1984 г., газета «Наука Урала» 29 ноября 1984 г.

ные явления), Игорь Юрьевич Шумилов (СВЧ-свойства).

В ходе изучения физических свойств магнитных шпинелей сотрудниками лаборатории были обнаружены и исследованы новые явления сильного электрон-магнонного взаимодействия в магнитных полупроводниках – разогрев магнонов, генерация спиновых волн носителями заряда в сильном электрическом поле [20,21]. Обнаружены управляемые электрическим полем СВЧ поглощение в CdCr_2Se_4 [22] и затухание магнитостатических волн в HgCr_2Se_4 [23]. В магнитном полупроводнике HgCr_2Se_4 обнаружен эффект черенковского усиления спиновых волн дрейфующими носителями

заряда [24], предсказанный А.И. Ахиезером, В.Г. Барьяхтаром и С.В. Пелетминским. Обнаружен и исследован новый механизм затухания спиновых волн, обусловленный носителями заряда [25], основанный на специфичном только для магнитных полупроводников магнитоэлектрическом механизме, предсказанном Э.Л. Нагаевым. Наиболее полно результаты экспериментальных исследований ферромагнитного резонанса и распространения магнитных колебаний в магнитных полупроводниках были обобщены и изложены в докторской диссертации Н.И. Солина [26], защита которой состоялась в 1998 г.

Работы лаборатории по возбуждению магнонов носителями тока в магнитных полупроводниках и по электрон-магнонному взаимодействию, имеющие важное фундаментальное и прикладное значение, отмечались в списке важнейших достижений АН СССР в 1979 и 1980 гг. Они были пионерскими и положили начало новому направлению на границе физики полупроводников и магнетизма – магнитоэлектронике, которое является логическим развитием современной физики и техники ферритов и магнитных полупроводников. Магнитоэлектроника имеет большое значение для развития современной СВЧ, лазерной и полупроводниковой техники. В настоящее время это направление именуется «спинтроника» и имеет необычайно широкое распространение в мире. Лаборатория магнитных полупроводников плодотворно работает в этом направлении совместно с другими лабораториями Института.

Другая важная особенность хромхалькогенидных шпинелей состояла в гигантских магнитооптических эффектах при широкой спектральной области, охватывающей ближний и средний

ИК-диапазон. Сотрудниками лаборатории был обнаружен эффект гигантского магнитопротекания ИК-излучения в ртутной шпинели HgCr_2Se_4 р- и n-типа, эффект Фарадея на носителях заряда, влияние магнитного упорядочения на примесное поглощение [27]. Эффект магнитопротекания заключается в изменении интенсивности проходящего через образец неполяризованного (естественного) света при приложении магнитного поля. Это позволяет создавать новые устройства магнитного управления интенсивностью светового потока при отсутствии поляризатора и анализатора. Была изучена анизотропия магнитосопротивления, магнитопротекания, определены параметры носителей заряда с учётом аномального эффекта Холла. Важно отметить высокое качество выращенных в лаборатории монокристаллов ртутной шпинели. На основе этих экспериментальных работ М.И. Ауслендером и Н.Г. Бебениным была создана модель зонной структуры хром-халькогенидных шпинелей, которая объясняла весь комплекс транспортных и оптических свойств [28]. Гигантские магнитооптические эффекты стали основой целого ряда разработанных оптоэлектронных магнитоуправляемых устройств (модуляторов излучения, полосовых магнитооптических фильтров, анализатора азимута поляризации излучения) [29]. Прикладные работы были выполнены в рамках хозяйственных работ с ЦНИИ Машиностроения Российского космического агентства в начале 90-х гг. Одна из работ лаборатории «Отрицательная дифференциальная проводимость антиферромагнитного полупроводника» [30] была выбрана для публикации в сборнике «Best of Soviet Semiconductor Physics and Technology», Edit. by American Institute of Physics, 1990 г. Детально результаты исследования электронной структуры, оптических и магнитооптических свойств, а также результаты прикладных исследований магнитных полупроводников были изложены в докторской диссертации Н.Н. Лошкаревой [31], защита которой состоялась в 1993 г.

В 1986 г. произошёл революционный прорыв в физике – А. Мюллер и Г. Беднорц открыли высокотемпературную сверхпроводимость в купрате $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ с критической температурой перехода 30 К. Повсеместно началась усиленная деятельность по достижению еще больших температур сверхпроводящего перехода и получению высококачественных монокристаллов. Высокий технологический потенциал, квалификация сотрудников и опыт в создании и исследовании новых материалов позволил лаборатории магнитных полупроводников быстро войти в новую область исследований. В лаборатории впервые в СССР были выращены монокристаллы $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ высокого качества с $T_c = 93$ К, на которых был сделан целый ряд работ не только в Институте, но и в других научных центрах [32]. На поликристаллах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ с дефицитом кислорода в совместной ра-



В.А. Костылев



А.И. Трофимов



С.В. Наумов



И.Ю. Шумилов



Н.В. Костромитина



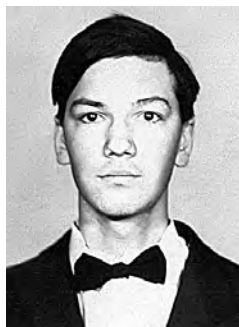
И.В. Кочев



И.Б. Смоляк



Н.А. Морозова



С.Н. Тугушев



Т.С. Автомонова

боте с лабораторией физики высоких давлений был получен рекордный для того времени барический коэффициент температуры сверхпроводящего перехода [33]. Практически одновременно началось комплексное изучение свойств низкоразмерного антиферромагнитного полупроводника CuO – первоосновы сложных сверхпроводящих оксидов. Была изучена анизотропия магнитных свойств, электронной проводимости и оптического поглощения, ЭПР монокристаллов CuO [34]. На основе цикла работ по оптическим и транспортным свойствам CuO , облучённого различными высокоэнергетическими частицами (электронами, He^+ , N^+), оксид меди, так же как и купратные ВТСП, был отнесён к сильно коррелированным соединениям [35,36]. Аномальные свойства CuO нашли объяснение в рамках модели фазы полярных конфигураций А.С. Москвина [37].

В лихие времена 90-х годов многие научные сотрудники стали покидать научные учреждения, в том числе и нашу лабораторию. Пожилые сотрудники ушли на пенсию, часть сотрудников перешли на работу в другие учреждения. Резко сократился приток талантливой молодёжи. Тем не менее, научная тематика лаборатории пользовалась популярностью среди коллег и по-прежнему привлекала к себе молодых учёных. В лабораторию пришел Станислав Нариманович Тугушев (оптические и магнитооптические свойства), а также инженер Роман Додохович Юсупов и старший лаборант Татьяна Степановна Автомонова.

В эти годы в лаборатории было обнаружено влияние сильного высокочастотного электрического поля на спектр и затухания магнитостатических волн в $p\text{-HgCr}_2\text{Se}_4$ [38]. Предложен способ получения гигантского магнитосопротивления, основанный на управлении магнитным полем контактной разностью потенциала p - n -перехода HgCr_2Se_4 , за счёт изменения в поле концентрации носителей заряда в n -слое HgCr_2Se_4 [38]. При этом величина эффекта магнитосопротивления может достигать сотен процентов в магнитном поле 10 кЭ при $T=78$ К. Важным результатом явилось обнаружение эмиссии в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне из гетероструктуры ферромагнитный полупроводник $p\text{-HgCr}_2\text{Se}_4$ – полупроводник $n\text{-InSb}$ или $n\text{-EuO}$ - $n\text{-InSb}$ при инжекции поляризованных носителей тока из ферромагнитного полупроводника в полупроводник $n\text{-InSb}$ [39]. Эти исследования создали предпосылку для интенсивного развития в институте научного направления «спинтроники», которое возглавил академик РАН Владимир Васильевич Устинов. В результате исследований был разработан спиновый инжекционный лазер, который отличается от большинства известных лазеров тем, что использует для получения активной среды квантовые энергетические уровни электронов проводимости, а не атомов или локализованных моментов, и имеет широкий диапазон излучения (от миллиметровых

до сантиметровых волн) при сохранении способности излучать в субмиллиметровом диапазоне при более высокой рабочей температуре, что улучшает его экономичность и расширяет область применения. Н.А. Виглиным и В.В. Устиновым было показано, что спин-инжекционный лазер может генерировать электромагнитное излучение мощностью от 6 до 75 мВт/А в диапазоне частот от 30 до 1500 ГГц и температурном интервале от 10 до 180 К. Принцип действия и технические характеристики лазера детально описаны в патенте РФ [40] и в работе [41].

В 1998 г. лабораторию магнитных полупроводников возглавил кандидат физ.-мат. наук Ю.П. Сухоруков. В это время активно изучаемым направлением физики магнитных полупроводников стало исследование легированных манганитов лантана $\text{Re}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$, где Re – редкоземельные элементы La, Pr, Nd и другие, А – щелочноземельные Sr, Ca, Ba и т.д., которые привлекли к себе внимание, в первую очередь, эффектом колоссального магнитосопротивления. Имея большой опыт работы с магнитными полупроводниками и развитую технологическую базу, коллектив лаборатории присоединился к этому направлению исследований физических свойств манганитов и выяснение природы колоссального магнитосопротивления.

Это время совпало с приходом в лабораторию молодых сотрудников: Елены Викторовны Мостовщиковой (Панфиловой) и Андрея Владимировича Телегина (оптические и магнитооптические явления), Веры Михайловны Цвелиховской и Тимофея Николаевича Павлова (инженеры).

Комплексное изучение структурных, магнитных, транспортных, оптических, магнитотранспортных и магнитооптических свойств легированных манганитов, направленное на анализ их электронной структуры и взаимосвязи электронной и магнитной подсистем, позволило определить ширину запрещенной зоны в LaMnO_3 (0,30 эВ при 293 К) и CaMnO_3 (1,55 эВ), обнаружить сосуществование локализованных (ИК-полос) и делокализованных (Друде-вклад) состояний в оптическом поглощении слаболегированных манганитов [42], получить доказательство существования в парамагнитном состоянии поляронов малого радиуса в дырочно-легированных манганитах, обнаружить переход от поляронной к зонной проводимости в электронно-легированных манганитах и определить параметры носителей заряда. При сравнении температурной зависимости ИК-поглощения и электропроводности было получено доказательство разделения фаз в электронной подсистеме дырочно-легированных манганитов, т.е. наличие «металлических» капель в диэлектрической матрице ниже температуры Кюри, и оценён относительный объём «металлической» фазы [43]. Наличие разделения фаз (сосуществование высокопроводящих «металлических» и диэлектрических областей с орбитальным упорядочением)



Е.В. Мостовщикова



А.В. Телегин



В.М. Цвелиховская



Т.Н. Павлов

было также показано для электронно-допированных манганитов $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{MnO}_3$ и кобальтитов $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$, а также для низкоразмерных манганитов $\text{La}_{1,2}\text{Sr}_{1,8}\text{Mn}_2\text{O}_7$. Было обнаружено, что анизотропия электро- и магнитосопротивления, термо ЭДС и коэффициентов линейного расширения слаболегированных манганитов начинают увеличиваться при температурах в два раза превышающих температуру Кюри ($T \approx 300$ К), что связано с анизотропией подвижности носителей заряда, как следствие анизотропии формы магнитных кластеров. Угловая зависимость магнитосопротивления описывается выражением $MR \sim K_1 \cos 2\theta + K_2 \cos 4\theta$, характерным для кристалла кубической симметрии [44]. Определены размеры высокопроводящих областей в слабопроводящей матрице, их эволюция при изменении температуры, концентрации легирующего элемента и переходе из парамагнитного в ферромагнитное упорядочение, а также их влияние на магнитные и магнитотранспортные свойства манганитов с колоссальным магнитосопротивлением [45, 46]. Подробный анализ свойств электронных и дырочных манганитов был отражён в докторской диссертации Е.В. Мостовщиковой «Взаимосвязь зарядовой и магнитной подсистем в сложных оксидах 3d металлов по данным ИК-спектроскопии» [47], которая была защищена в 2016 г.

В конце девяностых годов в лаборатории шёл активный поиск новых материалов, обладающих гигантскими магнитооптическими эффектами. Этот поиск привёл к обнаружению не только эффекта магнитопропускания, но и оптического отклика на переход металл-изолятор в манганитах, обладающих колоссальным магнитосопротивлением. Было установлено, что при переходе металл-изолятор в ИК-области спектра прозрачность может меняться в узком температурном интервале вблизи температуры Кюри в тысячи и даже в десятки тысяч раз, в зависимости от степени легирования манганита. Эффект магнитопропускания в манганитах является оптическим откликом на магнитный фазовый переход вблизи T_C и может достигать десятков процентов в широкой спектральной области (1,5–12 мкм). Были установлены физические механизмы, ответственные за магнитопропускание и связанные с взаимодействием света с локализованными и делокализованными состояниями и с изменением относительного объёма «металлической» фазы в манганитах. Создание высокочувствительной установки для изучения отражения света при различных температурах и в магнитных полях позволило обнаружить эффект гигантского магнитоотражения от единиц до десятков процентов. Важным является то, что гигантские магнитооптические эффекты имеют место как в монокристаллах, так и в плёнках, поликристаллах, композитах, гетероструктурах и сверхрешётках на основе манганитов. Исследования в этом направлении позволили создать ряд устройств практического применения манганитов в магнитооптоэлектронике. В основном, результаты этих исследований отражены в обзорах [48, 49], а также в докторской

диссертации Ю.П. Сухорукова «Оптическая спектроскопия сильно-коррелированных соединений: монооксид меди и манганиты лантана» [50], которая была защищена в 2007 г. Использование плёнок манганитов в различных комбинациях, в том числе с использованием ВТСП, ферритов со структурой шпинелей (CoFe_2O_4 , MnFe_2O_4), граната ($\text{Nd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) позволило разработать: модуляторы ИК-излучения [51–53] и «магнитную линзу» на основе гетероструктуры манганит-ВТСП [54].

Отдельно следует отметить развитие в лаборатории научного направления, связанного с созданием и исследованием физических свойств наноструктурированных материалов, которое курирует Б.А. Гижевский. В лаборатории магнитных полупроводников в содружестве с лабораторией физики высоких давлений, а также с РЯФЦ ВНИИТФ (Снежинск) и Институтом горного дела УрО РАН это направление развивается уже четверть века. Важность исследования физических свойств наноматериалов и применение их на практике подчёркивается включением индустрии наносистем в разряд приоритетных направлений развития науки, технологий и техники (в соответствии Указом Президента РФ 2011 года). В соавторстве с коллегами из других научных подразделений в лаборатории разрабатывались новые технологии получения высокоплотных оптических нанокерамик с применением динамических (взрывных) и квазистатических методов деформации магнитных полупроводников на основе двойных и тройных соединений, таких как CuO , Cu_2O , Mn_3O_4 , ZrO_2 , ZnSe , LaMnO_{3+y} , FeVO_3 , $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, разработаны оригинальные камеры высокого давления, детально описанные в патентах РФ [55], были получены прозрачные нанокерамики для магнитооптических устройств [56, 57]. Важным является экспериментально установленный факт, свидетельствующий о том, что по мере уменьшения размера зерна сначала происходит увеличение магнитооптического эффекта Фарадея в нанокерамике ЖИГ, а затем, начиная с размера зерна ~ 20 нм, эффект уменьшается. Другим важным фактом является обнаружение существенного изменения электронной структуры в нанокристаллических оксидах по сравнению со структурой для монокристалла, которым можно управлять изменением технологических режимов при получении нанокерамики. В результате исследований был создан наноструктурированный CuO с оптическими параметрами, необходимыми для создания селективных поглотителей солнечной энергии [58].

Начиная с 2010 г. лаборатория вновь пополнилась молодыми сотрудниками. К нам пришли Владимир Дмитриевич Бессонов (оптические свойства и Мандельштам-Бриллюэновское рассеяние света), Сергей Владимирович Телегин (синтез монокристаллов и рентгеновские свойства), Андрей Александрович Бучкевич и Валентина Анатольевна Бессонова (оптические и магнитооптические свойства).



В.Д. Бессонов

Молодым сотрудникам была поставлена задача освоить новые методики эксперимента, которые предполагается создать в лаборатории в будущем. К таким методикам относятся комбинационное рассеяние света, Мальденштам-Бриллюэновское рассеяние света (МБРС), эффект Керра. Для ознакомления с методиками А.В. Телегин прошел научную стажировку и провёл совместные научные работы в Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (Новосибирск), МИСиС (Москва), Балтийском федеральном университете им. Иммануила Канта (Калининград), Chungbuk National University (Южная Корея), Nijmegen University (Голландия). В.Д. Бессонов прошёл не только стажировку, но и обучение в аспирантуре в Bialystok University (Польша), в котором успешно защитил PhD диссертацию по Мальденштам-Бриллюэновскому рассеянию света в магнетных кристаллах на основе ЖИГ [59]. При покупке современной установки радиационной зонной плавки С.В. Наумов прошёл стажировку в МЭИ (Москва), что существенно сократило срок пуска установки и приступил к решению научных задач. С целью создания в лаборатории технологического метода получения плёнок магнитных полупроводников С.В. Телегин прошёл стажировку на химическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва) и в МИСиС (Москва).



В.А. Бессонова

Благодаря такому подходу в Институте была создана новая лаборатория Квантовой наноспинтроники, которую возглавили профессор Мюнстерского университета (Германия) Сергей Олегович Демокритов и бывший сотрудник лаборатории магнитных полупроводников Андрей Владимирович Телегин и это уже другая история института и лаборатории. Комбинация самой современной установки МБРС, технологических возможностей лабораторий магнитных полупроводников, квантовой наноспинтроники, нанокompозитных мультиферроиков и электрических явлений позволяет развить новое современное направление исследований «магنونика», связанное с изучением условий управления магнитостатическими спиновыми волнами в намагниченных средах, в том числе в «магнетных кристаллах» – искусственно созданных магнетных материалах с наличием управляемой магнетным полем запрещённой зоны и слабым затуханием магнитостатических волн.



С.В. Телегин



А.А. Бучкевич

В настоящее время в лаборатории магнетных полупроводников продолжают интенсивные научные исследования по целому ряду актуальных направлений. Первое направление можно сформулировать как изучение инъекции спин-поляризованных носителей в пленочных структурах ферромагнетик-полупроводник. Курирует это направление Н.А. Виглин при участии В.М. Цвелиховской и Т.Н. Павлова совместно с сотрудниками лаборатории электрических явлений [60]. Другое направление – наноматериалы на основе магнетных полупроводников (нанопо-

рошки, нанокерамика, оптические композиты). Это направление курирует Б.А. Гижевский, при участии лабораторий физики высоких давлений и рентгеновской спектроскопии. Наибольшее внимание уделяется сложным оксидам двойных и тройных соединений [61]. Третье направление – спин-зависимые явления в магнетных полупроводниках. Это направление курируют Н.И. Солин и Т.И. Арбузова при участии центра коллективного пользования «магнетных измерений». Особое внимание ими уделяется изучению магнетных, транспортных и магнетотранспортных свойств манганитов и кобальтитов со структурой перовскита [62, 63]. Четвёртое направление – оптические, магнетооптические явления и разделение фаз в магнетных полупроводниках и структурах на их основе. Это направление курирует Ю.П. Сухоруков и Е.В. Мостовщикова при участии В.Д. Бессонова, В.А. Бессоновой, А.А. Бучкевича, совместно с лабораториями квантовой наноспинтроники, электрических явлений и нанокompозитных мультиферроиков. Особое внимание уделяется изучению магнетострикционных материалов, например, монокристаллов CoFe_2O_4 , микроструктурированных плёнок манганитов (вариантная структура), а также монокристаллов слоистых систем $\text{EuBaCo}_{2-x}\text{O}_{5.5-\delta}$ [62, 64]. Новым направлением работы является изучение условий управления магнетостатическими спиновыми волнами в намагниченных плёнках и плёночных структурах на основе ЖИГ и пермалоя [65]. В работах по всем



С.В. Наумов в процессе работы с установкой радиационной зонной плавки.

научным направлениям принимает участие технологическая группа. Как было отмечено выше, ещё при создании группы ферритов, особое внимание уделялось технологии получения новых материалов на основе магнитных полупроводников. Долгие годы технологическую группу возглавляла Маргарита Ивановна Симонова. С 2000 г. её возглавляет Сергей Владимирович Наумов. Сейчас в состав группы входят высококвалифицированные специалисты Н.М. Чеботаев и С.В. Телегин, которым по плечу получить практически любой монокристалл, создать любую мишень для напыления плёнок, синтезировать поликристаллические и нанокристаллические порошки. Технологическая группа принимает участие в большинстве исследований, проводимых в нашей лаборатории, и тесно взаимодействует с другими научными подразделениями нашего Института, ИХТТ УрО РАН, Институтом высокотемпературной электрохимии УрО РАН и УрФУ.

Вместе с тем, сотрудники лаборатории интенсивно используют современные установки Института, в том числе установки лазерной абляции и магнетронного распыления лабораторий электрических явлений и электронной спектроскопии для выращивания тонких плёнок и тонкоплёночных структур.

В лаборатории имеется ряд уникальных высокочувствительных экспериментальных установок, позволяющие получать результаты мирового уровня. К таким установкам можно отнести криомагнитные оптические комплексы, созданные на базе модернизированных призмных и решёточных спектрометров ИК и видимой области спектра, работающие в температурном интервале от 80 до 400 К, в магнитных полях до 1 Т с различной ориентацией. Чувствительность этих установок на порядок превышает современные фабричные аналоги, что, в частности, позволяет изучать оптические свойства сильно поглощающих сред. Сотрудники лаборатории принимают участие в совместных экспериментах на современной установке Мандельштам-Бриллюэновского рассеяния света в лаборатории квантовой наноспинтроники, а также интенсивно используют магнетометр MPMS-5XL в центре коллективного пользования института.

Часть представленных научных результатов лаборатории магнитных полупроводников была получена при тесном сотрудничестве с ведущими научными центрами России и мира. Начало развития научных связей лаборатории было положено Алексеем Андреевичем Самохваловым. Он был лично знаком с ведущими учёными, занимающимися магнитными полупроводниками, Г. Бушем (G. Busch), С. Метфесселем (S. Methfessel), П. Вахтером (P. Wachter), М.И. Клигером, Э.Л. Нагаевым, К.П. Беловым, А.В. Гуревичем и многими другими. Значительная часть экспериментальных работ лаборатории выполнена в соавторстве с сотрудниками физического (группы профессора Е.А. Ганьшиной и профессора А.Б. Грановского) и химического факультетов МГУ им. М.В. Ломо-

носова (лаборатория профессора А.Р. Кауля), МИСиСа (лаборатория доцента Е.А. Степанцова), ИФ им. Киренского СО РАН (лаборатория профессора И.С. Эдельман), МИРЭА (профессор А.Н. Юрасов), МЭИ (лаборатория профессора А.М. Балбашова), ИХТТ УрО РАН (лаборатория чл.-корр. РАН В.Г. Бамбурова), ИОНХ РАН им. Н.С. Курнакова (лаборатория академика РАН В.А. Федорова), ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН (лаборатория профессора А.Г. Милехина), УрФУ (группа профессора А.С. Москвина), РЯФЦ ВНИИТФ (отдел Е.А. Козлова).

Кроме того, сотрудники лаборатории используют современную экспериментальную базу зарубежных научных центров. Наиболее плодотворно сотрудники лаборатории взаимодействуют с физическим факультетом Белостокского Университета (Польша), с лабораторией профессора А. Мазевского (A. Maziewski), с Университетом Неймегена (Голландия) с лабораторией профессора А.В. Кимеля (A.V. Kimmel), с Университетом Мюнстера (Германия) с лабораторией профессора С.О. Демокритова (S.O. Demokritov), с Университетом Чунгбука (Южной Кореи) с лабораторией профессора D. Nanto, с Национальным Университетом Cheng Kung (Тайвань) с лабораторией профессора Jan-Chi Derec Yang.

Всестороннее научное сотрудничество играет большую роль при решении поставленных научных задач, что легко проследить по публикациям лаборатории магнитных полупроводников. Развитие средств современных коммуникаций существенно расширяют возможности контактов между сотрудниками, ускоряют обмен образцов и обсуждение результатов исследования в режиме «on-line». Всё это формирует уже новейшую историю лаборатории магнитных полупроводников ИФМ УрО РАН.

Ю.П. Сухоруков, Н.Н. Лошкарева, Е.В. Мостовщикова

Список литературы

1. А.А. Самохвалов, И.Г. Факидов, Н.И. Давиденко, ФММ **4**, 249 (1957); **8**, 694 (1959); **8**, 834 (1959); **9**, 31 (1959); **10**, 538 (1960); ФТТ **2**, 414 (1960); **3**, 1650 (1961).
2. А.А. Самохвалов, А.Г. Рустамов, А.Н. Мень, ФТТ **3**, 3593 (1960); **5**, 1031 (1963); **5**, 1202 (1963); **6**, 969 (1964); **7**, 283 (1965); **7**, 1198 (1965); ФТТ **9**, 884 (1967); **10**, 3164 (1968); **11**, 554 (1969).
3. А.А. Самохвалов, Г.П. Скорняков, Н.М. Тутиков, **10**, 2760 (1968).
4. А.А. Samokhvalov, M.I. Klinger, Phys. Stat. Sol. B **79**, 9 (1977).
5. А.А. Самохвалов, Дисс... док. физ.-мат. наук, ИФМ АН СССР, Свердловск (1971).
6. А.А. Самохвалов, В.Г. Бамбуров, В.С. Бабушкин, ЖЭТФ **49**, 452 (1952); **54**, 1341 (1968); ФММ **20**, 309 (1965); ФТТ **8**, 2450 (1966); **9**, 559 (1967); **9**, 1573 (1967); **10**, 425 (1968); **10**, 2206 (1968); **10**, 2760 (1968); **11**, 483 (1969); **11**, 554 (1969).

7. А.А. Самохвалов, Т.И. Арбузова, М.И. Симонова, ФТТ **17**, 48 (1975); ФТТ **15**, 3690 (1973).
8. А.А. Самохвалов, *Редкоземельные полупроводники*, Под ред. В.П. Жузе, Наука, Ленинград (1977), С. 5.
9. А.А. Самохвалов, Н.Н. Лошкарева, Ю.П. Сухоруков, Г.К. Кладов, И.В. Курносос, *Оптико-механическая промышленность*, № 10, 18 (1987).
10. А.А. Самохвалов, Р.И. Тагиров, Н.Н. Лошкарева, А.А. Глазер, Н.М. Чеботаев, А. с. № 93910 (1976).
11. А.А. Самохвалов, Б.А. Гижевский, М.И. Симонова, Н.И. Солин, ФТТ **14**, 279 (1972).
12. Б.А. Гижевский, Н.Н. Лошкарева, А.А. Самохвалов, В.Я. Раевский, Н.М. Чеботаев, ФТТ **22**, 1193 (1980).
13. А.Ф. Гуничев, Н.Н. Лошкарева, Н.А. Виглин, Б.А. Гижевский, А.А. Самохвалов, В.Я. Раевский, Н.М. Чеботаев, ФТТ **21**, 1948 (1979); **22**, 1193 (1980).
14. А.Ф. Плотников, А.Н. Родионов, В.Н. Селезнев, А.А. Самохвалов, *Квантовая электроника* **3**, 2076 (1976).
15. А.А. Самохвалов, О.М. Таценко, В.В. Дружинин, А.И. Павловских, Н.Н. Лошкарева, ФТТ **19**, 3558 (1977).
16. А.А. Самохвалов, А.Ф. Гуничев, Н.Н. Лошкарева, Б.А. Гижевский, М.И. Симонова, Н.А. Виглин, Н.М. Чеботаев, А. с. № 132907 (1979); № 153840 (1981).
17. А.А. Самохвалов, Н.И. Солин, ФТТ **20**, 1910 (1978); **28**, 306 (1986).
18. А.А. Самохвалов, Н.И. Солин, В.В. Осипов, В.Т. Калинин, Т.Г. Аминов, в сб. *Тез. докл. 20 Всесоюзного совещания по физике низких температур*, (Москва, 1978), МГУ, Москва (1978), С. 46.
19. Т.И. Арбузова, И.Б. Смоляк, А.А. Самохвалов, ФТТ **38**, 1195 (1996).
20. А.А. Самохвалов, В.В. Осипов, В.Т. Калинин, Письма в ЖЭТФ **28**, 413 (1978); **30**, 658 (1979).
21. А.А. Samokhvalov, V.V. Osipov, N.I. Solin, JMMM **46**, 191 (1984).
22. А.А. Самохвалов, Н.И. Солин, В.Т. Калинин, ФТТ **18**, 2104 (1976).
23. Н.И. Солин, И.Ю. Шумилов, А.А. Самохвалов, Письма в ЖЭТФ **48**, 22 (1992).
24. Н.И. Солин, А.А. Самохвалов, И.Ю. Шумилов, Письма в ЖЭТФ **44**, 464 (1986); ЖЭТФ **94**, 223 (1988); ФТТ **33**, 2293 (1991).
25. В.А. Костылев, А.А. Самохвалов, ФТТ **32**, 1663 (1990).
26. Н.И. Солин, Дисс... док. физ.-мат. наук, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург (1998).
27. Н.Н. Лошкарева, Ю.П. Сухоруков, Б.А. Гижевский, Н.М. Чеботаев, А.А. Самохвалов, ФТТ **30**, 906 (1988).
28. М.И. Ауслендер, Н.Г. Бебенин, Б.А. Гижевский, Н.Н. Лошкарева, Ю.П. Сухоруков, ЖЭТФ **95**, 247 (1989).
29. Н.Н. Лошкарева, Ю.П. Сухоруков, А.А. Самохвалов, А. с. № 299465 (1988); Пат. РФ № 2025755 (1994); Пат. РФ № 2031423 (1995).
30. А.А. Самохвалов, В.А. Костылев, Б.А. Гижевский, Письма в ЖТФ **14**, 1552 (1988).
31. Н.Н. Лошкарева, Дисс... док. физ.-мат. наук, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург (1993).
32. Т.И. Арбузова, И.Б. Смоляк, С.В. Наумов, ФТТ **39**, 425 (1997); ФНТ **19**, 244 (1993).
33. А.А. Самохвалов, Б.А. Гижевский, Н.Н. Лошкарева, В.А. Костылев, ФММ **65**, 930 (1988).
34. Т.И. Арбузова, И.Б. Смоляк, С.В. Наумов, ФТТ **47**, 1309 (2005); **40**, 1876 (1998); JMMM **95**, 168 (1991); Theor. Phys. **86**, 559 (1998).
35. Н.Н. Лошкарева, Ю.П. Сухоруков, Б.А. Гижевский, ФТТ **37**, 376 (1995); **39**, 2141 (1997); **40**, 419 (1998); **41**, 1564 (1999).
36. Т.И. Арбузова, С.В. Наумов, ФТТ **52**, 1143 (2010); Письма в ЖЭТФ **89**, 478 (2009).
37. А.А. Москвин, Н.Н. Лошкарева, Ю.П. Сухоруков, А.А. Самохвалов, ЖЭТФ **105**, 967 (1994); **108**, 1830 (1995); Письма в ЖЭТФ **63**, 251 (1996); **24**, 7 (1998).
38. Н.И. Солин, С.В. Наумов, ФТТ **39**, 664 (1997); ФТТ **50**, 864 (2008).
39. V.V. Osipov, N.A. Viglin, A.A. Samokhvalov, Phys. Lett. **A 247**, 353 (1998).
40. Н.А. Виглин, В.В. Устинов, Пат. РФ № 2007126305 (2007).
41. В.В. Осипов, Н.А. Виглин, *Радиотехника и электроника* **48**, 601 (2003).
42. E. Ganshina, N. Loshkareva, Yu. Sukhorukov, E. Mostovshchikova, A. Vinogradov, L. Nomerovannaya, JMMM **300**, 62 (2006).
43. E.V. Mostovshchikova, N.G. Bebenin, N.N. Loshkareva, Phys. Rev. B **70**, 12406 (2004).
44. Н.И. Солин, С.В. Наумов, ЖЭТФ **128**, 623 (2005); ФТТ **47**, 1826 (2005).
45. Н.И. Солин, С.В. Наумов, ФТТ **55**, 1734 (2013); ЖЭТФ **143**, 166 (2013); ЖТФ **86**, 78 (2016); JMMM **401**, 677 (2016).
46. Т.И. Арбузова, С.В. Наумов, Письма в ЖЭТФ **98**, 88 (2013); **111**, 857 (2015); ФТТ **55**, 53 (2013); **58**, 1080 (2016).
47. Е.В. Мостовщикова, Дисс... док. физ.-мат. наук, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург (2016).
48. A. Granovsky, Yu. Sukhorukov, E. Gann'shina, A. Telegin, *Magnetophotonics From Theory to Application*, Springer-Verlag, Berlin, New York, Dordrecht, London (2013) P. 107.
49. Ю.П. Сухоруков, Н.Н. Лошкарева, А.В. Телегин, Е.В. Мостовщикова, *Оптика и спектроскопия* **116**, 73 (2014); JMMM **383**, 104 (2015).
50. Ю.П. Сухоруков. Дисс... док. физ.-мат. наук, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург (2007).
51. Ю.П. Сухоруков, Н.Н. Лошкарева, А.А. Самохвалов, Письма в ЖТФ **22**, 85 (1996).
52. Ю.П. Сухоруков, Б.А. Гижевский, Н.Н. Лошкарева, А.В. Телегин, В.Д. Бессонов, Пат. РФ № 2346315 (2009); Пат. РФ № 88165 (2009); Пат. РФ № 2439637 (2012); Пат. РФ № 2497166 (2013).
53. Ю.П. Сухоруков, Н.Н. Лошкарева, Е.А. Ганьшина, ФММ **107**, 622 (2009).
54. Ю.П. Сухоруков, Н.Н. Лошкарева, Е.А. Ганьшина, Письма в ЖТФ **25**, (1), 6 (1999).
55. В.П. Пилюгин, Б.А. Гижевский, А.М. Пацелов, Пат. РФ № 61882 (2007); Пат. РФ № 60727 (2007).
56. Б.А. Гижевский, Л.В. Номерованная, А.А. Махнёв, ФТТ **51**, 1729 (2009); Письма в ЖЭТФ **91**, 85 (2010).
57. Б.А. Гижевский, Е.В. Мостовщикова, А.В. Телегин, Н.Н. Лошкарева, Пат. РФ № 129665 (2013).
58. Ю.П. Сухоруков, Б.А. Гижевский, Е.В. Мостовщикова, Письма в ЖТФ **32**, 81 (2006).
59. V. Bessonov. Diplom... dok. fizycznych nauk, Uniwersytetu Bialystoku, Bialystoku Polskiej (2014).

60. N.A. Viglin, V.V. Ustinov, V.M. Tselikhovskaya, T.N. Pavlov, A.O. Shorikov, E.I. Patrakov, Направлена в 2017 в J. Appl. Phys., № JR17–1759.
61. V.R. Galakhov, V.V. Mesilov, B.A. Gizhevskii, N.A. Skorikov, S.V. Naumov, O.Yu. Vilkov, Appl. Phys. A **118**, 649 (2015); Журнал структурной химии **56**, 556 (2015).
62. Н.И. Солин, С.В. Наумов, Письма в ЖЭТФ **104**, 236 (2016); JMMM **401**, 677 (2016).
63. Т.И. Арбузова, С.В. Наумов, С.В. Телегин, ФТТ **59**, 517 (2017).
64. Ю.П. Сухоруков, А.В. Телегин, А.П. Носов, Письма в ЖЭТФ **104**, 398 (2016); ФТТ **59**, 284 (2017).
65. M. Evelt, V.E. Demidov, V. Bessonov, Appl. Phys. Lett. **108**, 172406 (2016); Nature Communication (2016) DOI: 10.1038/ncomms10446; Scientific Reports **6**, 32781 (2016).

ЛАБОРАТОРИЯ

НАНОКОМПОЗИТНЫХ МУЛЬТИФЕРРОИКОВ

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Носов Александр Павлович, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.
- Арбузов Вадим Леонидович, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Брезгина Нина Васильевна, электроник
- Варенков Владимир Ильич, главный специалист
- Выходец Владимир Борисович, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Грибов Игорь Васильевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Давлетшин Андрей Эрнстович, главный специалист
- Данилов Сергей Евгеньевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Деревсков Андрей Юрьевич, ведущий электроник
- Дружинин Анатолий Владимирович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Дружков Анатолий Павлович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Дубинин Станислав Сергеевич, ведущий инженер
- Куренных Татьяна Евгеньевна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Лаврукова Елена Ивановна, главный специалист
- Москвина Наталья Анатольевна, научный сотрудник
- Николаев Александр Львович, научный сотрудник
- Обухов Святослав Игоревич, младший научный сотрудник
- Осотов Владимир Иванович, главный специалист
- Перминов Денис Александрович, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Распопова Галина Александровна, старший инженер, к.т.н.
- Рыбаков Владимир Николаевич, инженер
- Рыбаков Владимир Николаевич, инженер
- Старицын Алексей Викторович, ведущий технолог
- Титов Александр Натанович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Титов Алексей Александрович, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Шкварина Елена Геннадьевна, научный сотрудник, к.ф.-м.н.

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ НАНОКОМПОЗИТНЫХ МУЛЬТИФЕРРОИКОВ

Лаборатория нанокompозитных мультиферроиков (ЛНКМФ) была образована с 1 октября 2013 года на основании приказа № 55 от 13.10.2013 г. путём объединения лаборатории электронной спектроскопии с частью лаборатории неравновесных процессов и структур. Приказом №213-к от 4.10.2-13 г. заведующим лабораторией был назначен д.ф.-м.н., с.н.с. А.П. Носов.

Каждая из лабораторий, вошедших в состав ЛНКМФ, имела свою собственную историю. Приказом № 2 от 1 января 1934 г. в тогда ещё Уральском физико-техническом институте Наркомтяжпрома СССР был организован отдел изучения диффузии (заведующий – В.С. Бугаков). Приказом № 154 от 28 ноября 1936 г. отдел был реорганизован в лабораторию диффузии. Постановлением Президиума Уральского филиала АН ССР от 3 января 1941 г. руководителем лаборатории диффузии был назначен В.И. Архаров. Приказом № 364а от 19 ноября 1969 г. объединением лаборатории излучений с группой диффузии радиоактивных индикаторов была образована лаборатория диффузии отдела радиационной физики твёрдого тела. Заведующим лабораторией был назначен С.М. Клоцман. Приказом № 66 от 15 июня 1979 г. из лаборатории рентгеновской спектроскопии была выделена группа новых спектральных методов (руководитель – О.Б. Соколов). Приказом № 100 от 8 июня 1987 г. на базе лаборатории диффузии и группы новых спектральных методов был создан отдел диффузионных явлений в следующем составе: лаборатория диффузии (заведующий – С.М. Клоцман), лаборатория физики плёнок и покрытий (заведующий – И.Ш. Трахтенберг), лаборатория электронной спектроскопии (заведующий – О.Б. Соколов), лаборатория радиационных дефектов (заведующий – В.Л. Арбузов). Приказом № 7 от 1 апреля 2005 г. на базе лаборатории радиационных



Соколов Олег Борисович

дефектов и лаборатории физики плёнок и покрытий была создана лаборатория неравновесных процессов и структур (заведующий – В.Б. Выходец). Приказом № 5 от 14 февраля 2007 г. в отделе металлических наноструктур была создана группа электронной спектроскопии (руководитель – А.П. Носов), которая приказом № 28 от 27 ноября 2007 г. была преобразована в лабораторию электронной спектроскопии, а приказом № 38 от 25 декабря 2008 г. введена во вновь образованный отдел наноспинтроники.

Сегодня в ЛНКМФ работают 26 сотрудников, включая 15 научных сотрудников, 12 кандидатов наук и 2 доктора наук. Лаборатория ведёт фундаментальные и прикладные исследования в таких перспективных направлениях, как синтез наноструктур нанокompозитных мультиферроиков методом импульсного лазерного осаждения (ИЛО), исследование состава поверхности твёрдых тел методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), радиационной физики твёрдого тела и радиационно-стимулированных фазовых явлений, позитронной аннигиляции. Лаборатория располагает уникальным комплексом ускорительного оборудования (протонный и электронный ускорители).

С момента образования в лаборатории помимо исследований по темам государственного задания выполнены исследования по 20 проектам различного уровня (Президиума РАН, Уральского отделения РАН, РФФИ). Сотрудниками лаборатории опубликовано 65 статей в высокорейтинговых иностранных и российских журналах, 54 тезиса докладов на международных и российских конференциях, выполнено 7 хозяйственных договоров с предпри-

ятиями реального сектора экономики на общую сумму 2,27 млн. руб.

Формирование научных направлений нынешней лаборатории происходило в течение многих лет при непосредственном участии ведущих учёных ИФМ, таких как В.А. Трапезников, С.М. Клоцман, О.Б. Соколов, В.Б. Выходец, В.Л. Арбузов, А.П. Носов. Внутренняя логика этих процессов была продиктована как общими тенденциями развития перспективных направлений мировой науки, так и стремлением разных поколений ведущих учёных ИФМ выполнять исследования в актуальных научных областях на уровне, соответствующем мировому. Лаборатория всегда



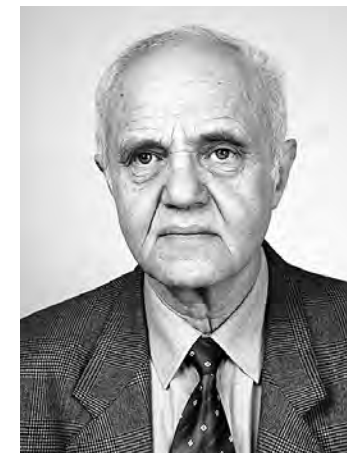
Арбузов Вадим Леонидович

поддерживает высокий уровень проводимых исследований. Работы, ведущиеся в лаборатории, являются новыми, регулярно докладываются на международных конференциях и семинарах неоднократно признавались в числе лучших работ института и включались в достижения РАН.

История развития метода РФЭС в ИФМ

Основателем научного направления РФЭС в ИФМ является д.т.н., профессор Виктор Александрович Трапезников (1925–2016 гг.). После окончания Молотовского университета (г. Пермь) в 1952 г. он поступил в ИФМ в аспирантуру к С.А. Немнонову в лабораторию рентгеновской спектроскопии. В 1958 г. защитил кандидатскую диссертацию, в 1976 – докторскую. В 1962 г. В.А. Трапезников был назначен заместителем директора ИФМ по науке и проработал в этой должности до 1977 г. когда переехал в г. Ижевск руководителем Ижевского Отдел ИФМ УНЦ АН СССР [1]. В 60-е годы В.А. Трапезников трижды стажировался в Упсальском университете (Швеция) у проф. К. Зигбана, исследования которого были удостоены Нобелевской премии 1981 года в области атомной физики с формулировкой «...за вклад в развитие электронной спектроскопии высокого разрешения...». Именно после его работ в мире начались интенсивные исследования явлений, процессов и методов исследований поверхности и приповерхностных слоёв твёрдых тел.

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) – это метод определения химического состава приповерхностных (в пределах глубины 1 нм) слоёв вещества, основанный на анализе энергетических спектров фотоэлектронов, вылетающих из свободных атомов и атомов в молекулах и твёрдых телах при облучении их рентгеновским или ультрафиолетовым излучением. Свои первые научные исследования К. Зигбан выполнял на спектрометрах с магнитным энергоанализатором. Именно спектрометр такого типа (безжелезный магнитный электронный спектрометр высокого разрешения) был построен в ИФМ под руководством В.А. Трапезникова к 1973 г. коллективом исполнителей, в который входили О.Б. Соколов, А.В. Евстафьев, В.П. Сапожников, И.Н. Шабанова, О.И. Ключников, Ф.Б. Максютин, В.Л. Кузнецов [2]. Спектрометр был назван ЭС ИФМ-1 (электронный спектрометр разработки ИФМ, модель 1). К 1975 году в ИФМ была построена модель ЭС ИФМ-2, позже переданная на Верхнее-Салдинский металлургический завод. ЭС ИФМ-1 был перевезён В.А. Трапезниковым в г.Ижевск, где эксплуатировался в течение долгого времени.

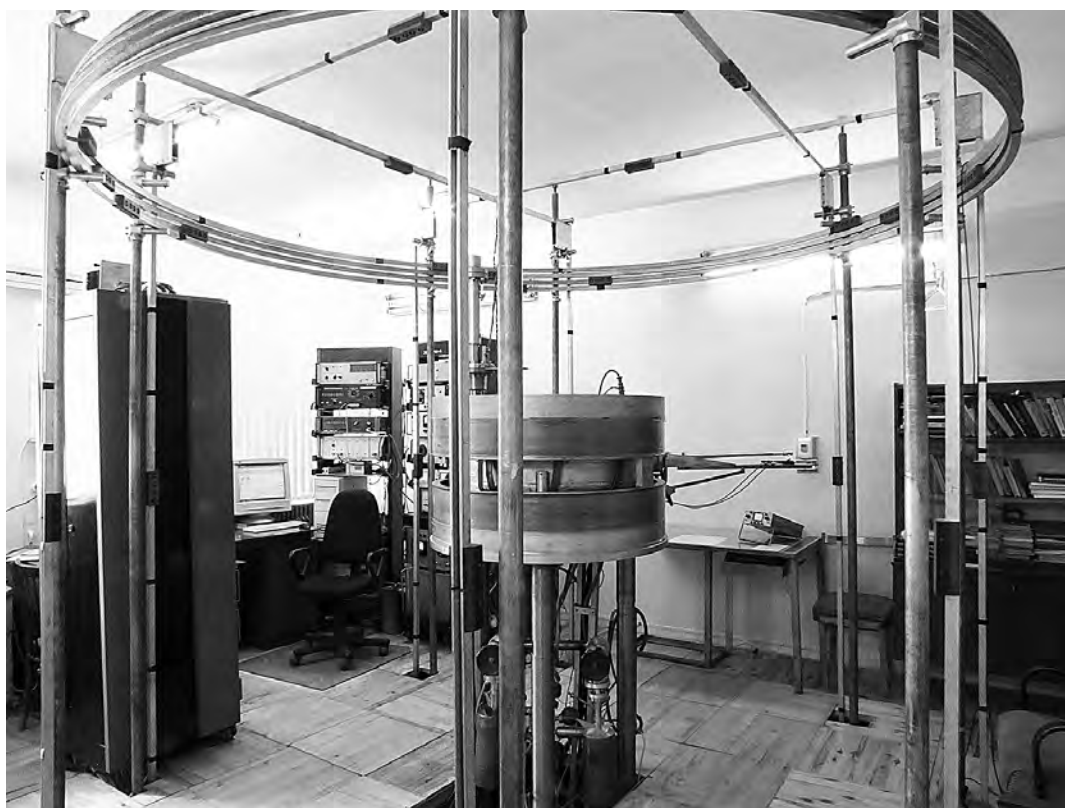


Выходец Владимир Борисович



Носов Александр Павлович

После отъезда В.А. Трапезникова работы по созданию РФЭС спектрометров в ИФМ возглавил Олег Борисович Соколов. По плану НИР в 1978 г. были начаты работы по изготовлению нового прибора с улучшенными характеристиками, соответствующими лучшим мировым образцам. Важно отметить, что ни в то время, ни гораздо позже никакие другие организации в СССР и РФ не ставили перед собой столь масштабных задач. Появившиеся позже приборы для анализа поверхности, разработанные в СКБ научного приборостроения АН СССР, предприятиях Министерства электронной промышленности, Институте ядерной физики АН Казахской ССР, были с электростатической фокусировкой. В области создания магнитных спектрометров приоритет уральской науки неоспорим. В 1982 г. были закончены работы по изготовлению спектрометра ЭС ИФМ-3 [3], который обладал уникальными для своего времени характеристиками. Коллектив исполнителей включал сотрудников группы новых спектральных методов (О.Б. Соколов, В.Л. Кузнецов, Ф.Б. Максютков, В.К. Финашкин, Н.Н. Вяткин, И.В. Грибов, А.Б. Самсонов), конструкторов (В.М. Гольдберг, Т.Н. Ждановских, В.Е. Горякин, А.В. Евстафьев, Г.Н. Кухарчук, Ю.Л. Куклин). Работы велись при активном участии отдела метрологии (Н.С. Усиевич, Н.И. Но-



Электронный спектрометр ЭС ИФМ-4

викова), технологического отдела и мастерских (Т.И. Глазунова, Э.Л. Мяконьких, В.Н. Чемоданов).

Методические возможности спектрометра РФЭС

Спектрометр ЭС ИФМ-3 был чисто магнитным, не имел системы торможения анализируемых электронов, поэтому чтобы достичь оптимального разрешения при регистрации валентных электронов его электронная оптика была рассчитана и выполнена под класс точности энергоанализа выше 10^{-4} . В то время считалось, что попытки использовать торможение электронов до входа в энергоанализатор невозможны, так как экранировка образца от потенциала земли, под которым находится вакуумная система, исключит применение необходимых средств воздействия на образец.

Как было показано практически, введение системы торможения не исключило использование таких средств воздействия на образец, как его нагрев или охлаждение и ионное травление. При этом появилась возможность использовать стандартный в электронной спектроскопии режим регистрации CAE (constant analyzer energy) и снизить требования для класса точности анализа, что в значительной мере упростило и сделало более удобным эксплуатацию спектрометра. Результатом усовершенствования прибора в этом направлении стал переход на работу с классом точности $7 \cdot 10^{-3}$ на той же вакуумной системе, но новым использованием фокусирующих катушек и катушек компенсации земного поля, а также была полностью автоматизирована система регистрации спектра и проведена метрологическая аттестация спектрометра и используемых на нём методик измерения. Прибор был назван ЭС ИФМ-4 [4].

При вводе образца используется штоковая система шлюзов, что позволяет проводить оперативную смену образцов без нарушения вакуума. Скорость травления ионной пушки, используемой для очистки поверхности образца, составляет величину порядка 0,1 нм/мин. Тепловое воздействие на образец проводится в пределах от -100 °C до $+400$ °C, а с помощью специального нагревателя – до $+1000$ °C. В рентгеновском источнике используется двойной Al/Mg-анод с электрическим переключением, изготовленный методом сварки взрывом. С помощью гетероионных и криогенных средств откачки достигается сверхвысокий вакуум с давлением остаточных газов порядка $5 \cdot 10^{-10}$ Тор. При использовании алюминиевого анода и выборе в режиме CAE энергии пропускания 100 эВ разрешение спектрометра постоянно по спектру и составляет величину порядка 1,5 эВ.

Исследования, выполненные на спектрометре РФЭС

Уникальность результатов, полученных с помощью метода РФЭС – локальность по глубине, возможность проводить качественный и полуколичественный анализ состава практически всех химических элементов, чувствительность к химическому состоянию атомов – сделали спектрометр ЭС ИФМ-4 востребованным в ис-

следованиях, проводимых как в Институте, так и по НИР с другими организациями. Можно назвать такие темы как изучение сплавов РЗМ, углеродных материалов с низкой размерностью (фуллерены, карбины), сверхпроводящих материалов. В последнее время с помощью послойного травления активно изучаются многослойные структуры, включая состав границ раздела между слоями.

Основные научные результаты

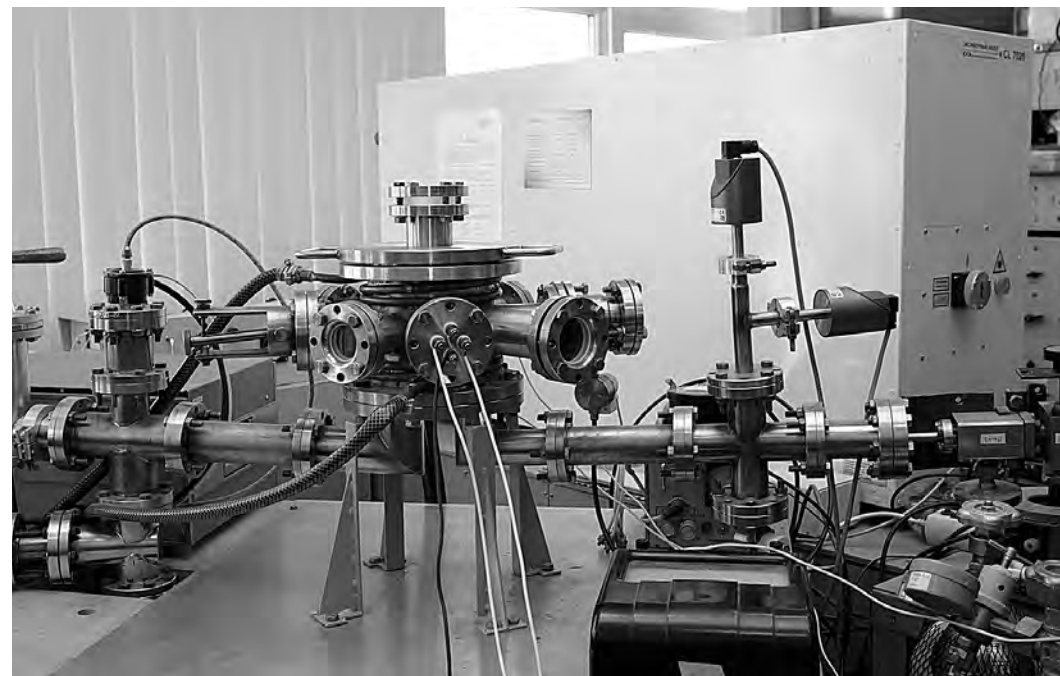
В 70-х годах при появлении спектрометра в Институте и на протяжении последующих 10–20 лет любые сообщения об исследованиях с его использованием, в которых развивались новые возможности прибора, являлись важным вкладом в мировую науку, поскольку сам метод только развивался. Одновременно такие работы можно отнести и к научному приборостроению. По окончании этого периода роль метода РФЭС изменилась и электронная спектроскопия стала рабочим инструментом при решении широкого круга научных задач. В настоящее время исследования на приборе выполняют И.В. Грибов и Н.А. Москвина.

В процессе создания прибора необходимо было решить множество технических, технологических и научных задач, начиная от выбора и обустройства помещения с подходящей магнитной обстановкой, разработки и освоения технологии сварки титана, необходимой для изготовления немагнитной вакуумной системы, созданием уникального по чувствительности и миниатюрности датчика магнитного поля для системы компенсации и заканчивая теоретическими расчётами электронной оптики энергоанализатора.

Основным достижением для сотрудников ИФМ, работавших над созданием спектрометра, видимо, следует считать то, что прибор много лет практически без перерывов надёжно работает. Академик В.В. Устинов как-то сказал во время ознакомительной экскурсии, что в своё время здесь был передовой фронт приборостроения и были пионерские работы, а теперь этот прибор – «рабочая лошадка».

История развития метода ИЛО в ИФМ

Метод импульсного лазерного осаждения (ИЛО), или в английском варианте Pulsed Laser Deposition (PLD), является одним из методов получения тонкоплёночных наноструктур посредством физического осаждения из газовой фазы и основан на взаимодействии высокоэнергетического лазерного импульса с материалом мишени, взрывообразном «испарении» материала мишени и переносе его в вакууме или низком давлении рабочего газа на подложку. Реализация метода стала возможной после создания мощных лазеров. Необходимость использования именно лазеров для получения тонких плёнок была в полной мере осознана после открытия высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в купратах составов $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$, за что в 1987 г. К. Мюллер и Г. Беднорц получили Нобелевскую премию по физике с формулировкой



Установка импульсного лазерного осаждения

«за важный прорыв в физике, выразившийся в открытии сверхпроводимости в керамических материалах». Вскоре потребовались тонкие плёнки ВТСП и оказалось, что только методом ИЛО удастся получать плёнки подобных материалов с хорошими физическими свойствами. Несколько позже метод ИЛО стал общепризнанным для получения тонких плёнок и наногетероструктур со слоями из материалов со сложным химическим составом. Развитие метода ИЛО в ИФМ тесным образом связано с правильно понятой в свое время заведующим лабораторией электрических явлений В.В. Устиновым мировой тенденции перехода к исследованиям физических явлений на наноуровне. Благодаря этому в институте в лаборатории электрических явлений сначала появилась установка молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), затем – магнетронного распыления и несколько позже – установка ИЛО. Применительно к магнитным материалам, которыми занимались в институте с момента его создания, эта тенденция предполагала получение тонких плёнок и наноструктур на основе магнитных материалов и исследование широкого круга магнитных явлений на наноуровне. Наиболее ярким подтверждением правильности этого выбора стало присуждение Нобелевской премии по физике 2007 г. П. Грюнбергу и А. Ферту с формулировкой «за открытие гигантского магнитосопротивления». К этому времени наноструктуры такого же типа уже получали на установке МЛЭ в ИФМ.

С вводом в эксплуатацию установки ИЛО институт стал обладателем наиболее полного «арсенала» для получения наногетероструктур самого широкого класса материалов методами МЛЭ, магнетронного распыления и ИЛО.

Работами по развитию метода ИЛО занималась группа под руководством А.П. Носова, который в 1980 г. закончил Московский физико-технический институт, в 1984 г. защитил кандидатскую диссертацию, с 1983 по 1987 гг. работал в Физико-техническом институте (г. Ижевск), а с 1987 г. – в Институте физики металлов в котором прошёл путь от старшего научного сотрудника до заведующего лабораторией и заместителя директора. Важную роль в понимании возможностей и перспектив метода ИЛО сыграли стажировки А.П. Носова в Гренобле в Институте им. Л. Нееля Национального центра научных исследований Франции (CNRS). С учётом полученного опыта установка в ИФМ изначально проектировалась для обеспечения условий роста многокомпонентных наноструктур при температурах подложки до 800 °С при давлении кислорода 1 атм., со сменным держателем мишеней, позволявшим в одном технологическом цикле использовать до четырёх материалов. Установка может быть использована для получения тонких плёнок и наногетероструктур на основе широкого класса материалов, обладающих свойствами магнетиков, сегнетоэлектриков, металлов, полупроводников.

Исследования, выполненные на установке ИЛО

В последние годы во всем мире наблюдается взрывообразный интерес к веществам и структурам со свойствами мультиферроиков, в которых одновременно проявляются свойства ферромагнетиков, сегнетоэлектриков и/или сегнетоэластиков. Свойствами таких структур можно управлять посредством приложений различных внешних воздействий: магнитных, электрических полей, деформаций. Важно, что за счёт взаимодействия различных подсистем возникают свойства, не присущие каждой из подсистем в отдельности. Если взять структуру со слоями из магнитоэлектрических и сегнетоэлектрических материалов, то в ней наблюдается магнитоэлектрический эффект (МЭ), который в самой общей формулировке можно охарактеризовать как возникновение поляризации под действием магнитного поля или появление намагниченности под действием внешнего электрического поля. Если в такой структуре имеются слои из материала с большой магнитоэлектричностью, а также слои из сегнетоэлектрического материала с большим пьезоэлектрическим коэффициентом, то за счёт комбинации свойств отдельных слоёв можно получить большую величину МЭ: в силу механической связи между слоями при приложении внешнего магнитного поля магнитоэлектричество вызовет деформацию сегнетоэлектрической фазы и появление электрического сигнала. Наоборот, при приложении электрического напряжения к сегнетоэлектрику произойдёт его деформация, которая, опять же при наличии меха-

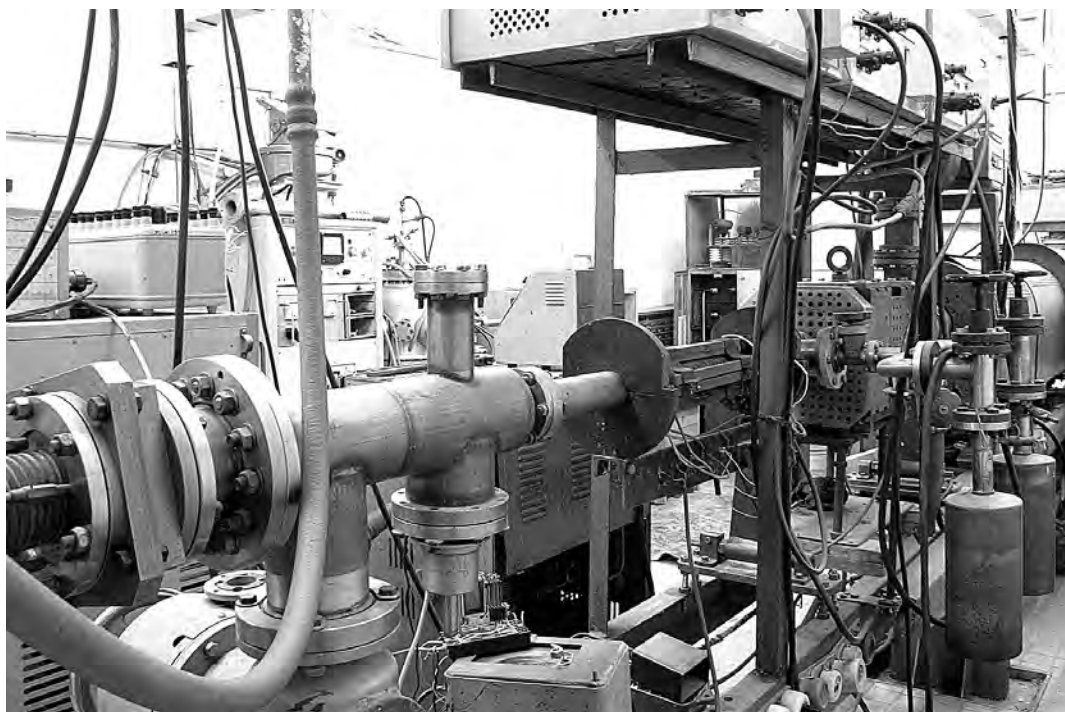
нической связи между слоями, приведёт к намагничиванию магнитоэлектрической фазы. МЭ эффект представляет большой интерес для создания нового поколения датчиков магнитных полей, преобразования энергии переменного магнитного поля в электрическое и наоборот, электрогенераторов, магнитоэлектроники и спинтроники. Особый интерес представляет разработка тонкоплёночных наноструктур со свойствами мультиферроиков. На установке ИЛО был сделан акцент на выращивание высококачественных тонких плёнок и наногетероструктур из материалов, которые трудно получить другими методами, имеющимися в институте. К таковым, в частности, относятся материалы класса «галфенол» (сплавы системы Fe–Ga), обладающие большой (до $\approx +300 \cdot 10^{-6}$) положительной магнитоэлектричностью.

Теоретически было предсказано, что если в наноструктуре скомбинировать слои с положительным, например, галфенол, и отрицательным, например, никель, коэффициентами магнитоэлектрики, то это позволит существенно увеличить значение МЭ. Методом ИЛО были получены такие наноструктуры с градиентом коэффициента магнитоэлектрики в пределах магнитного слоя на сегнетоэлектрических подложках PMN-PT и экспериментально подтверждено существенное улучшение МЭ свойств [5–7]. Также был выполнен цикл работ по росту монокристаллических плёнок допированных марганитов и исследованиям их структурных, магнитных, транспортных и оптических свойств [8, 9]. Работы и исследования проводят В.В. Дубинин, В.И. Осотов, А.В. Дружинин, В.И. Варенков, А.Ю. Деревсков, Н.В. Брезгина.

История создания комплекса ускорительной техники

В 1963 г. руководством института было принято решение о строительстве корпуса для ускорителя электронов на базе лаборатории излучений ИФМ с целью выполнения исследований в области радиационной физики. Лабораторией в то время руководил Абрам Константинович Кикоин (1914–1999 гг.), собравший большой коллектив энтузиастов – инженеров и научных работников. Здание комплекса ускорителей было построено в 1966 г. Необходимость приобретения в Институт физики металлов ускорителя лёгких ионов, или, для краткости, протонного ускорителя, была обоснована заведующим лабораторией диффузии Семеном Моисеевичем Клоцманом (1930–2016 гг.) примерно в 1970 г.

К тому времени уже состоялась, без преувеличения, революция в методиках исследований диффузии в твёрдых телах, основанная на последних достижениях в регистрации альфа-частиц, электронов и гамма-лучей. Исследователи научились с высокой точностью измерять очень низкие концентрации атомов в твёрдых телах, их координатные распределения и коэффициенты диффузии: они измерялись в широком диапазоне с точностью в несколько процентов, а энергия активации диффузии с точностью 0,5 %.

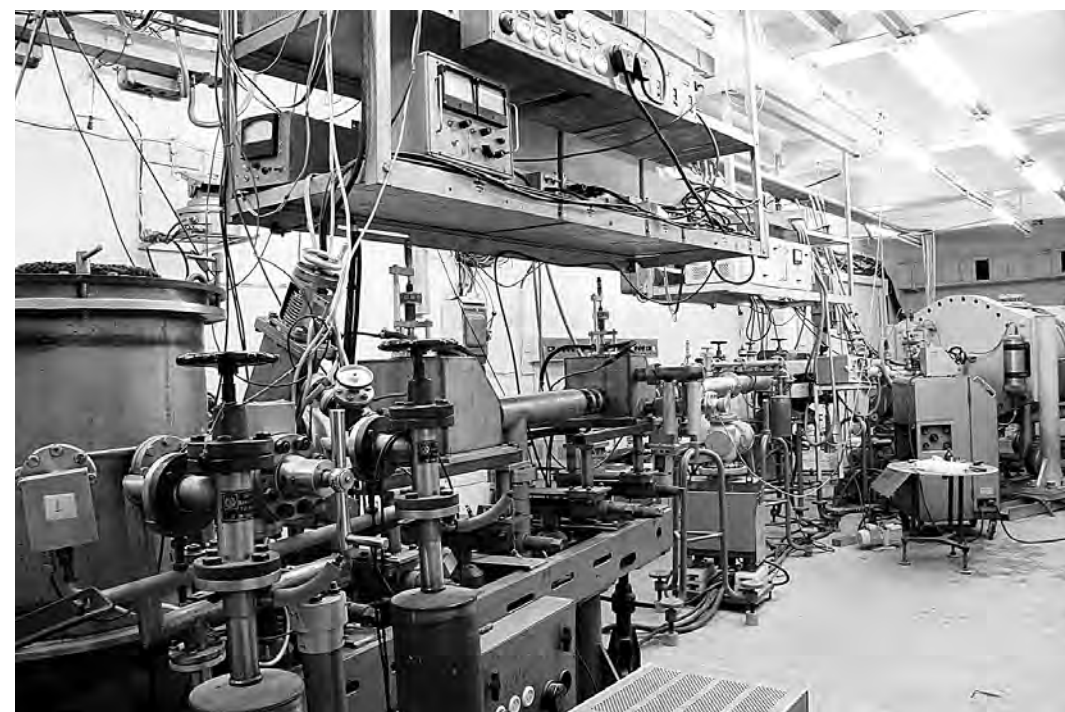


Линейный ускоритель электронов ЛУЭ-25

Соответствующие исследования выполнялись в нескольких научных центрах в США, Германии, Франции и других стран. Учёные СССР участвовали в этой революции, и коллектив, возглавляемый С.М. Клоцманом, успешно конкурировал с другими советскими и зарубежными научными группами. Следствиями этой революции были новые представления о дефектной структуре твёрдых тел, механизмах взаимодействия атомов, корреляционных эффектах при диффузии и т.д. Для изотопов лёгких элементов метод радиоактивных индикаторов находил ограниченное применение, поскольку для большинства из них отсутствовали радиоактивные индикаторы с достаточно большим временем жизни. В частности, методику радиоактивных индикаторов нельзя было применить для исследования диффузии изотопов кислорода, азота, лития и многих других лёгких элементов. Это было серьёзное ограничение, т.к. с атомами лёгких элементов связаны особые механизмы диффузии. Кроме того, атомы лёгких элементов характеризуются широкой распространённостью в природе, высокой химической активностью, участием во многих природных и технологических процессах, сильным влиянием на свойства металлов даже при низких концентрациях. Но для изотопов лёгких элементов появилась альтернатива, похожая на методику радиоактивных индикаторов. Если образец, содержащий изотопы лёгких элементов (до ^{19}F вклю-

чительно), облучать высокоэнергетичными протонами, дейтронами или ядрами гелия, то во время облучения появляются продукты ядерных взаимодействий: альфа-частицы и протоны. Это явление можно было использовать для исследования диффузии лёгких элементов, и требовался протонный ускоритель. Идея С.М. Клоцмана соответствовала мировым тенденциям. К началу 70-х годов уже появились первые работы по диффузии кислорода в металлах, выполненные с помощью методики ядерного микроанализа (в английской литературе Nuclear Reaction Analysis (NRA)).

Сначала нужно было решить вопрос о приобретении ускорителей. В то время купить импортные ускорители было нереально, но в Советском Союзе существовала организация, которая могла спроектировать и изготовить как протонный ускоритель, так и ускоритель электронов. Это был Всесоюзный научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры (ВНИИЭФА), находившийся в пригороде Ленинграда. Этот институт относился к мощному Минсредмашу. В СССР было плановое хозяйство, и у Академии наук не было реальных рычагов заставить Минсредмаш сделать ускоритель. Но это можно было сделать по партийной линии. В результате сформировалась цепочка: ИФМ в лице С.В. Вонсовского – Свердловский обком КПСС – Ленинградский обком КПСС – ВНИИЭФА. Не очень быстро, не очень гладко, но дело постепенно пошло. Рядовые сотрудники ИФМ приезжали в ВНИ-



Зал ускорителя легких ионов ЭГ-2М-1

ИЭФА и видели, что там ничего не делается, С.В. Вонсовский звонил в наш обком, оттуда звонили в Ленинградский обком. В итоге протонный ускоритель ЭГ-2М-1 и ускоритель электронов ЛУЭ-25 спроектировали, изготовили и поставили в институт. В ИФМ был смонтирован ускоритель электронов на 5 МэВ (в укороченном варианте) поскольку для создания радиационных повреждений достаточно этой энергии. По международным стандартам это были не самые совершенные ускорители. Их нужно было дорабатывать на месте, т.е. в ИФМ. Душой коллектива при доработке ускорителей был В.А. Павлов. Он глубоко разобрался в этой технике, установил контакты со специалистами из Обнинска и других ускорительных центров страны, последовательно шаг за шагом улучшал параметры машин. В результате удалось создать вполне работоспособные ускорители. Его ближайшими помощниками были П.В. Лерх, А.М. Розенблат и Г.В. Епифанов. Позднее В.А. Павлова сменил А.Э. Давлетшин.

Исследования, выполненные на ускорителе протонов

Почти всё на протонном ускорителе ИФМ находится на мировом уровне. Можно ускорять протоны и дейтроны, что есть далеко не у всех. Сила тока пучка находится на уровне, достаточном для проведения большинства исследований по физике конденсированного состояния и материаловедению. Ускоритель ЭГ-2М-1 эксплуатируется уже 42 года, хотя предельный срок эксплуатации подобного оборудования у ведущих мировых фирм не превышает 20 лет.

Научную группу, работающую на пучке протонного ускорителя, с самого начала возглавлял В.Б. Выходец. Большой вклад в становление и развитие этой группы внесли В.В. Степанов, И.К. Голубков, Н.С. Саканцев, А.Д. Левин и Т.Е. Куренных. Особенно нужно выделить Т.Е. Куренных. Она и сейчас работает в ИФМ, защитила кандидатскую диссертацию по диффузии кислорода в титане, выполненную с использованием ускорителя, руководила несколькими проектами РФФИ и играет ключевую роль в научных, методических и прикладных работах группы. В последнее время появились и новые сотрудники, которые продолжают обслуживать ускоритель и выполнять научные исследования с использованием ускорительных методик. Это В.Н. Рыбаков, А.В. Сучков С.И. Обухов. Сначала научные сотрудники участвовали в доработке ускорителя, создавали ядерно-физический ускорительный комплекс, который включал сам ускоритель, системы формирования и мониторинга пучка, вакуумную камеру рассеяния с держателями образцов, электронные тракты, полупроводниковые детекторы и многое другое. В Советском Союзе всё это нельзя было просто купить, это надо было разработать, спроектировать и изготовить самим. Некоторое представление о комплексе даёт приведённая в этой статье фотография. На ней представлено оборудование комплекса, размещённое в специализированном бункере кор-

пуса ускорителей: ускоритель, ионопровод, линия формирования пучка и вакуумная камера рассеяния, видны также откачные системы. В этом подвальном помещении сотрудники, обслуживающие комплекс, по соображениям радиационной безопасности работают только при выключенном ускорителе. Постоянно они работают в других помещениях, где расположены пульты управления ускорителем, пульты управления системами экспериментальной установки и аппаратура для регистрации и обработки спектров, получаемых при исследовании образцов.

Первая методическая статья группы, работающей на протонном ускорителе, появилась в 1983 г., а первая полноценная научная статья по диффузии изотопа кислорода ^{18}O в титане, выполненная на ускорителе, была опубликована в 1987 г. Всего за время существования группы было опубликовано около 50 статей в изданиях, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, выполнено 15 проектов РФФИ, более 15 проектов РАН и УрО РАН, более 20 хозяйственных договоров, В.Б. Выходец и Т.Е. Куренных были соавторами 3 коллективных монографий. Сотрудники группы принимали участие в международных, российских и советских научных конференциях по диффузии, физике и химии конденсированного состояния электростатическим ускорителям, пучковым технологиям, физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, наноматериалам, несколько раз были победителями конкурсов на лучшую научную работу ИФМ. Список изданий, в которых публиковались статьи является обширным, можно назвать такие авторитетные журналы, как «Журнал экспериментальной и теоретической физики», «Письма в ЖЭТФ», «Surface Science», «Физика металлов и металловедение», «Defect and Diffusion Forum», «Journal of Applied Physics», «Nuclear Instruments and Methods».

Оправдались ли ожидания С.М. Клоцмана, что с помощью ускорителя протонов можно будет распространить революцию в диффузионных исследованиях на атомы лёгких элементов? И да, и нет. С одной стороны, в результате деятельности нашей и других групп с аналогичной методикой не появилось большого объёма прецизионных данных по диффузии в металлах для атомов лёгких элементов. Такого типа результаты удалось получить только для систем с высокой растворимостью атомов лёгких элементов, например, для диффузии кислорода в альфа-титане. С другой стороны, группа ИФМ всё-таки достигла рекордного уровня измерений коэффициентов диффузии для изотопов лёгких элементов в металлах, который ранее был характерен только для методики радиоактивных индикаторов. Правда, это имело место только на одном объекте. При исследовании диффузии кислорода в альфа-титане была достигнута точность определения коэффициентов диффузии в несколько процентов, а в энергии активации диффузии – 0,5 %. Это была работа 1989 г. С этой публикацией связана интересная история. В статье было написано про рекордную точность, постав-

лены под сомнение результаты других работ, но в целом статья прошла незамеченной. На неё ссылались, как на одну из многих работ по диффузии кислорода в титане. И только 22 года спустя появилась работа H.H. Wu, D.R. Trinkle, Phys. Rev. Lett. 107, 045504 (2011), в которой с помощью теории функционала плотности были рассчитаны коэффициенты диффузии кислорода в альфа-титане. В ней констатировалось, что результатам расчётов из первых принципов полностью удовлетворяли только данные ИФМ. Если более подробно говорить о первых научных достижениях группы по диффузии, то нужно упомянуть ещё две работы. В одной из них были проведены измерения коэффициентов диффузии кислорода на одном образце монокристалла альфа-титана с помощью NRA и вторичной ионной масс-спектрометрии. Используемые методики кардинально отличались друг от друга по принципам измерения концентраций и глубины в диффузионной зоне. Результаты этих двух измерений совпали в пределах статистических погрешностей двух экспериментов, они были близки к 1 %. Это означало не только высокую статистическую точность измерений, но и достоверность самих значений коэффициентов диффузии. Ещё в нескольких работах были проведены исследования температурной зависимости анизотропии коэффициентов диффузии кислорода в монокристаллах альфа-титана. Уникальность этой работы состояла в том, что удалось измерить анизотропию коэффициентов диффузии на очень низком уровне (около 10 %), что также является рекордным по точности и чувствительности диффузионным измерением. Таким образом, примерно к 1990 г. в ИФМ был создан ускорительный комплекс, на котором были проведены рекордные по точности исследования диффузионных параметров для атомов лёгких элементов в твёрдых телах. Эти рекордные достижения не превзойдены до сих пор. В настоящее время применение ускорителя вышло далеко за пределы диффузионной тематики.

Классический вариант методики NRA, который есть у группы ИФМ и большинства других коллективов, работающих с этой методикой, обеспечивает без разрушения образца измерение глубинных распределений изотопов лёгких элементов в твёрдых телах. Точность измерений концентраций находится на уровне нескольких процентов, разрешение по глубине составляет примерно 0,1 мкм, чувствительность при измерении концентраций находится на уровне 0,01 ат.%. Методика NRA обеспечивает измерение концентраций большинства, но не всех, стабильных изотопов лёгких элементов. К ним обычно относят изотопы легкого ^{19}F . Широкое применение находит ещё один вариант методики NRA – резерфордское обратное рассеяние (POP). Она основана на упругом обратном рассеянии ускоренных частиц ядрами атомов мишени. Эта методика обычно используется для измерения концентраций атомов тяжёлых элементов в лёгкой матрице. По мере появления новых научных задач в группе выполнялись ра-

боты по развитию методик, основанных на использовании NRA. На настоящий момент времени можно отметить следующие оригинальные методические достижения:

- исследования могут проводиться не только на массивных образцах, но и на порошках, в том числе на нанопорошках;
- разработан вариант методики повышенной локальности по поверхности образца, он обеспечивает исследование с помощью NRA зоны образца с линейным размером до 0,1 мм, в классическом варианте характерный размер исследуемой зоны составлял 1 мм;
- исследования могут проводиться не только при комнатной температуре образцов, но также в интервале температур от 400 °С до температуры жидкого азота, в частности, в этом диапазоне могут проводиться диффузионные отжиги и другие обработки материалов непосредственно в вакуумной камере рассеяния установки.

Кроме тех результатов, которые упоминались выше, отметим следующие научные результаты

1. Установлено существование позиционно-плоскостного эффекта при диффузии атомов кислорода в высокотемпературных сверхпроводниках и других оксидах со слоистой атомной структурой [10]. На этой основе была предложена методика диффузионно-структурного анализа, Она позволяет исследовать топологию потенциальных энергетических барьеров при диффузии атомов кислорода в оксидах со слоистой структурой.

2. Получены экспериментальные данные по температурной зависимости кислородного изотопного обмена и коэффициентов диффузии кислорода [11] в оксидах металлов. Широкая постановка этих исследований была обусловлена тем, что оксиды являются важными функциональными материалами, в частности, это относится к нанопорошкам оксидов. Исследования на нанопорошках позволили существенно расширить диапазон измеряемых коэффициентов диффузии в сторону низких значений, примерно, до 10^{-22} м²/с.

3. Разработана принципиально новая методика для измерения коэффициентов диффузии дейтерия в твёрдых телах. Она получила название ядерный микроанализ в режиме реального времени (английская аббревиатура NRAOL) [12]. С помощью NRAOL можно получать данные по диффузии дейтерия в материалах, в которых водород не растворим и которые разрушаются при отжиге в агрессивных водородосодержащих средах, а также при низких, даже криогенных температурах.

4. Исследования пространственного распределения ионов кислорода и поверхностного кислородного дефицита в оксидных наночастицах [13]. Было установлено, что к моменту завершения высокотемпературного синтеза в наночастицах оксидов наблю-

дается сильный поверхностный кислородный дефицит. Было показано, что этот эффект представляет интерес для практических приложений, в частности, он может иметь следствием кардинальное изменение в стратегии применения оксидных нанопорошков и обеспечить синтез нанопорошков с представляющими интерес для практики регулируемые каталитическими, электронными, магнитными и другими функциональными свойствами.

5. Прикладные и фундаментальные исследования по технологии титанового производства, выполненные по инициативе корпорации ВСМПО-АВИСМА. В основном они были посвящены газосодержащим дефектам металлургического происхождения при выплавке титановых сплавов [14] и направлены на повышение качества титановой продукции. По результатам исследований была получена наиболее репрезентативная база данных по газосодержащим дефектам в титановых сплавах и разработана схема идентификации источников дефектов.

Из приведённого перечня основных научных результатов видно, что исследования с помощью протонного ускорителя в ИФМ проводятся одновременно по нескольким фундаментальным и прикладным направлениям. В определенной степени такая политика является вынужденной. Дело в том, что нормальное функционирование ускорительного комплекса требует постоянного финансирования: это затраты на расходные материалы, полупроводниковые детекторы, стабильные малораспространённые изотопы, например, кислород ^{18}O и т.д. Поскольку госбюджетное финансирование на эти цели минимально уже около 30 лет, то комплекс должен либо сам себя финансировать, либо прекратить существование. К настоящему времени в России уже перестали работать несколько ускорительных центров, за рубежом такой тенденции нет.

Исследования, выполненные на ускорителе электронов

После пуска ускорителя электронов начались активные исследования радиационных повреждений в чистых ГЦК металлах. Было показано, что межузельные атомы подвижны при низких температурах, о чём в то время велось немало научных споров. Были проведены уникальные работы по исследованию субструктуры III стадии отжига в чистых ГЦК металлах, Cu, Ag, Au, получена аномальная температурная зависимость энергии активации в температурном интервале третьей стадии отжига. В Донецком физико-техническом институте был заказан проточный гелиевый криостат для облучения и измерений при гелиевых температурах, а также для проведения низкотемпературных отжигов. Для обеспечения равномерности облучения по всей зоне была разработана система сканирования электронного пучка, позволявшая настраивать максимум интенсивности на площади 10×10 мм². На базе купленных установок типа УСУ-4 в лаборатории был создан комплекс оборудования для высокотемпературных облу-

чений (до 600 °С) и отжигов (до 1500 °С) в сверхвысоком вакууме. Для улучшения работы этих установок был спроектирован и изготовлен в двух экземплярах вакуумный шлюз, существенно облегчающий смену держателей образцов.

Таким образом в лаборатории на базе линейного ускорителя электронов был создан уникальный для СССР комплекс аппаратуры для проведения облучений образцов от гелиевых до высоких температур в чистом гелии или в высоком вакууме, прецизионных отжигов исследуемых металлов и сплавов от азотных температур до 1500 °С в очищенном гелии или в сверхвысоком вакууме. Под руководством В.Л. Арбузова собралась успешная группа исследователей: А.Ф. Матвиенко, С.Е. Данилов, А.Э. Давлетшин, А.Л. Николаев, Д.Э. Доманский, А.П. Дружков, Д.А. Перминов, К.В. Шальнов.

В 1987 г. после переезда изотопной части лаборатории в новый корпус (корпус А) на базе ускорителей была образована лаборатория радиационных дефектов которую возглавил В.Л. Арбузов.

При облучении высокоэнергетическими частицами происходят радиационно-индуцированные структурно-фазовые изменения в металлах и сплавах. Эти изменения могут серьёзно влиять на физико-механические свойства и развитие таких негативных явлений, как вакансионное распухание и охрупчивание при высокодозовом облучении. При этом определяющую роль играет поведение и взаимодействие точечных дефектов (вакансий и межузельных атомов) с атомами примесей и компонентами сплавов. Поэтому основным научным направлением работы на базе ускорителя электронов стала физика радиационных повреждений и радиационно-стимулированных фазовых явлений. Работы направлены на исследования взаимодействия радиационных дефектов с примесными атомами замещения и внедрения. Основное внимание уделяется исследованиям радиационно-индуцированных процессов в сплавах Fe–Cr, Fe–Ni, Fe–Cr–Ni, конструкционных нержавеющих сталях, ванадиевых сплавах, корпусных реакторных сталях, модельных сплавах и чистых металлах. Исследуемые вопросы относятся к фундаментальной проблеме физики конденсированного состояния - поведении многокомпонентных сплавов и соединений в неравновесных условиях при облучении, деформации и термообработках.

За время работы на ускорительном комплексе электронов получены следующие существенные результаты.

- Показано, что сера, фосфор, кремний, растворённые в никеле на уровне, обычном для конструкционных аустенитных нержавеющих сталей, при облучении выпадают из твёрдого раствора в виде гомогенно зарождающихся нановыделений. Установлен механизм радиационно-индуцированной объёмной сегрегации 3sp примесей (Si, P, S) в никеле [15].

- Обнаружен эффект подавления III стадии отжига радиационных дефектов в никеле за счёт захвата мигрирующих вакансий на атомах углерода [16].

- Показано, что в концентрированных сплавах Fe–Cr по сравнению с чистым Fe миграция междоузлий затруднена вследствие захвата на конфигурациях из атомов Cr.

- В конструкционных перлитных корпусных реакторных сталях обнаружены и исследованы особенности образования и стабильности медьсодержащих выделений при каскадном (нейтронном) и бескаскадном (электронном) облучениях. Показано, что образующиеся выделения могут быть растворены восстановительным отжигом при 400–500 °С. Это имеет практический смысл и широко применяется для продления сроков службы действующих реакторов.

- Исследована радиационно-индуцированная сегрегация дейтерия на ловушках, исходных и генерируемых облучением в различных металлах (никель, титан, ванадий) и сплавах различного состава на их основе. Изучены закономерности захвата и определены способы отделения насыщающихся ловушек от ненасыщающихся.

- Проведены исследования влияния легирования дейтерием и облучения накопления и отжига радиационных дефектов на физико-механические свойства аустенитной стали 16Cr15Ni3Mo1Ti при низкотемпературных (77 К) нейтронном и электронном облучениях. Показано, что дейтерий (300 ат. ppm) снижает пластичность на 25%. Присутствие гелия (2,0–2,5 ат. ppm), введённого по методу тритиевого трюка, сказывается на пределе текучести и практически не сказывается на охрупчивании. Как при электронном, так и при нейтронном облучении существует линейная связь между приростом предела текучести и корнем квадратным из концентрации радиационных дефектов. Отжиг вакансий происходит в районе 300 К (энергия миграции 1,0–1,1 эВ). Энергия диссоциации вакансионных кластеров –1,4–1,5 эВ, (480 К) [17].

- Показано, что под действием облучения в нержавеющей стали и её аналогах – модельных железо-никелевых сплавах – происходит упорядочение твёрдого раствора (0–500 °С) по типу расслоения. Наблюдающийся при этом рост остаточного электросопротивления до 20% и КТР до $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при облучении и деформации сплавов Fe–Ni и Fe–Ni–P связан с расслоением твёрдого раствора за счёт миграции вакансий как радиационного, так и деформационного происхождения. Энергия диссоциации вакансионных кластеров разной конфигурации 1,15 и 1,5 эВ. Полученные результаты согласуются с матричной моделью распада твёрдого раствора. При расслоении формируются выделения второй фазы типа FeNi, и понижается концентрация никеля в матрице. Наблюдается близкая к линейной связь увеличения КТР и прироста электросопротивления при облучении отожжённых и деформированных сплавов [18].

- Установлены закономерности образования и эволюции радиационно-индуцированных выделений интерметаллидной фазы в сплавах Fe–Ni–Ti и легированных титаном нержавеющей сталях. Показано, что в нержавеющей сталях и сплавах Fe–Ni–Ti подавляются процессы расслоения, и при облучении (при 150–300 °С) или высокотемпературных отжигах происходит выделение γ' - фазы, уменьшающей накопление вакансий и вакансионных дефектов [19].

- Экспериментально показано, что в чистом никеле, при нейтронном и электронном облучениях вблизи комнатных температур наблюдается сепарация радиационных дефектов, определяемая дислокационной микроструктурой и её пространственным распределением как при электронном облучении, так и при нейтронном облучении малыми дозами. При больших дозах нейтронного облучения (выше 10^{18} см^{-2}) сепарация отсутствует из-за высокой концентрации вакансионных кластеров.

История создания комплекса позитронной аннигиляционной спектроскопии

В конце 60-х годов XX века в лаборатории диффузии ИФМ были начаты работы по изучению образования и эволюции радиационно-индуцированных дефектов. Для генерации дефектов использовалось облучение быстрыми электронами (5 МэВ) на ускорителе ЛУЭ-25. Для диагностики дефектов использовался метод измерения остаточного электросопротивления (ОЭС), который имеет высокую чувствительность к точечным дефектам. Однако кроме дефектов, этот метод чувствителен ещё и к структурно-фазовым превращениям, поэтому для диагностики дефектов измерение ОЭС эффективно только для чистых металлов и разбавленных сплавов.

В этот период на Западе вышла серия работ по динамике позитронов в твёрдых телах профессора Штуттгартского Университета Альфреда Зеегера. После этих основополагающих работ во многих материаловедческих центрах мира начались исследования атомной и электронной структуры твёрдых тел с использованием позитронной аннигиляции. Успешное использование методов аннигиляции позитронов на Западе и научные задачи лаборатории диффузии явились предпосылками для создания этих методик в ИФМ.

Позитронная аннигиляционная спектроскопия (ПАС) является уникальным методом, позволяющим исследовать электронную структуру и некоторые физико-химические свойства твёрдых тел. Позитрон инжектируется в образец и аннигилирует с электронами. При этом испускаются два γ -кванта, которые разлетаются в противоположных направлениях. Скорость аннигиляции (и, соответственно, время жизни) позитрона определяется электронной средой. Характеристики аннигиляционного излучения (угол разлёта гамма-квантов и их энергия) определяются величиной и на-

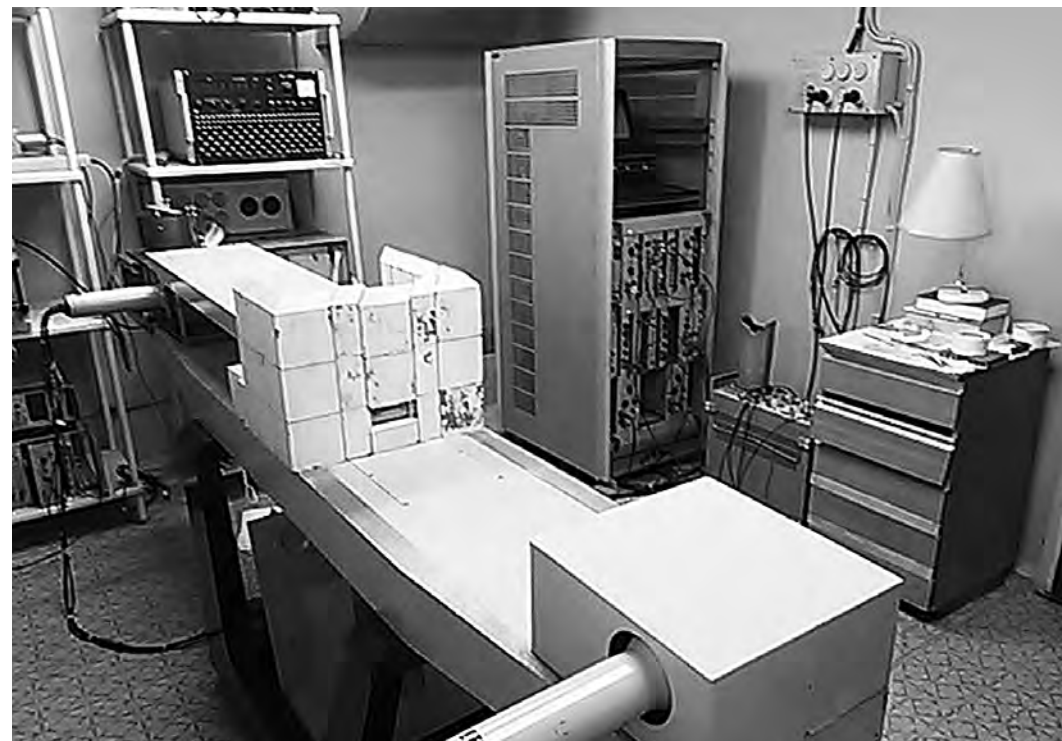
правлением импульса аннигилирующего электрона. Измерение интенсивности аннигиляционного излучения в зависимости от угла разлёта аннигиляционных квантов или их энергии позволяет определять распределение электронов по импульсам в исследуемом материале. Измерение соответствующих характеристик аннигиляции лежит в основе методик измерения времени жизни позитрона, угловой корреляции аннигиляционного излучения (УКАИ) и доплеровского уширения аннигиляционной линии (ДУАЛ).

Наиболее активно ПАС используется для изучения дефектов вакансионного типа (вакансий, вакансионных кластеров, петель вакансионного типа), а также дислокаций и границ зёрен в субмикро- и нанокристаллических материалах. Эти дефекты являются ловушками для позитрона. Когда позитрон захватывается и аннигилирует в них, меняются аннигиляционные характеристики (время жизни позитронов, импульсное распределение аннигиляционных γ -квантов), поскольку электронная структура внутри дефекта отличается от электронной структуры бездефектного материала. Величина соответствующих изменений определяется напрямую размером и концентрацией (плотностью) дефектов. ПАС обладает высокой чувствительностью к дефектам как по размерам (дефекты вакансионного типа: от 0,1 до 3 нм, зерна: до 100 нм), так и по концентрации (вакансии: 10^{-3} – 10^{-6} на атом, дислокации: 10^{12} – 10^{15} м⁻²) дефектов. Кроме того, методы измерения импульсного распределения аннигиляционных квантов (УКАИ и ДУАЛ) позволяют определять химические элементы, с электронами которых происходит аннигиляция. Благодаря этому можно идентифицировать химическое окружение центра аннигиляции позитрона.

Помимо дефектов, позитроны могут также локализоваться внутри «бездефектных» нано-размерных выделений второй фазы, присутствующих в исследуемых материалах, если они имеют предпочтительное сродство к позитрону по сравнению с матрицей (конфайнмент позитронов, индуцированный предпочтительным сродством). В этом случае аннигиляционные характеристики будут определяться структурой выделений.

Инициатором формирования этого научного направления был заведующий лабораторией диффузии С.М. Клоцман. В 1977 г. по его инициативе был заключён договор с Союзным НИИ приборостроения Минсредмаша (СНИИП) на разработку установок для наблюдения параметров позитронной аннигиляции. Содействие в заключение договора оказал заместитель директора ИФМ профессор С.К. Сидоров, имевший авторитет и связи в Средмаше как ветеран «атомного проекта». В 1979 г. СНИИП поставил в ИФМ автоматизированный спектрометр УКАИ с угловым разрешением 0,5 мрад и спектрометр времени жизни позитронов, изготовленные коллективом МИФИ как соисполнителей договора.

В течение нескольких лет спектрометр УКАИ в силу разных причин (отсутствие квалифицированных специалистов, недоуком-



Установка импульсного лазерного осаждения

лектованность поставки и др.) не эксплуатировался. Пуско-наладочные работы на спектрометре начались в 1982 г. с приходом в лабораторию Анатолия Павловича Дружкова, который к тому времени прошёл стажировку в МГУ у профессора Г.С. Жданова и доктора В.Л. Седова – пионеров в СССР по применению позитронов в физике металлов, а также участвовал в организации и развитии методов позитронной аннигиляции в отделе радиационного материаловедения Института ядерной физики АН Казахской ССР. В течение года по инициативе А.П. Дружкова на предприятии Минсредмаша в г. Усолье-Сибирское были заказаны и приобретены недостающие сцинтилляционные детекторы, а также комплекс СЭГС-06 временного и энергетического анализа. С 1984 года были начаты непрерывные измерения.

Исследования, выполненные на комплексе позитронной аннигиляционной спектроскопии

На спектрометре УКАИ были проведены исследования накопления радиационных дефектов при электронном облучении, их взаимодействие между собой и с атомами примесей, а также изучена кинетика отжига точечных дефектов и их скоплений в никеле и разбавленных сплавах на его основе. В результате этих работ была подтверждена вакансионная природа третьей стадии

отжига. Кроме работ с никелем проводились работы с ферритными Fe–Cr сплавами и сталями по кинетике образования и отжига радиационных дефектов. Совместно с Институтом химии твёрдого тела (член.-корреспондент РАН А.А. Ремпель) был проведён большой цикл работ по исследованию электронной структуры нестехиометрических карбидов тугоплавких металлов.

В середине 90-х годов в лаборатории начались исследования радиационной повреждаемости в инварных Fe–Ni сплавах, которые являются модельными по отношению к аустенитным нержавеющим сталям, применяемым в качестве конструкционных материалов в атомных реакторах. Методом УКАИ были исследованы процессы образования и отжига точечных дефектов и их комплексов при пластической деформации и электронном облучении. По полученным данным были рассчитаны энергетические характеристики точечных дефектов и их комплексов (энергия миграции, энергия связи и т.п.). Было исследовано влияние легирующих добавок, таких, как P, Si, Al и Ti, на эволюцию дефектной структуры. Полученные данные позволили обнаружить и изучить образование и эволюцию комплексов точечный дефект – атом легирующего элемента, а также влияние этих процессов на радиационную повреждаемость сплавов.

С 2000 года на спектрометре УКАИ ведутся работы по исследованию микроструктуры стареющих Fe–Ni сплавов, её эволюции при термическом, деформационном и радиационном воздействиях. Благодаря этим работам была обнаружена локализация позитронов в интерметаллидных наночастицах Ni₃Al, образующихся в стареющем сплаве Fe–Ni–Al в результате термически- и радиационно-индуцированного старения [20]. Этот эффект, обозначенный в литературе как индуцированный преимущественным сродством конфаинмент, за несколько лет до этого был обнаружен исследователями из Японии на двойных сплавах Fe–Cu. В тройных системах этот эффект был обнаружен впервые. Локализация позитронов в интерметаллидных наночастицах выделений позволяет изучать кристаллическую и химическую структуру выделений [21]. В холоднодеформированном Fe–Ni сплаве, легированном титаном, был обнаружен эффект блокировки захвата позитронов дислокациями, обусловленный сегрегацией титана и образованием интерметаллидных частиц Ni₃Ti на дислокациях. Этот эффект, совместно с исследованием остаточного электросопротивления, позволил изучить процессы гетерогенного образования интерметаллидных частиц на дислокациях [22].

Одновременно с изучением поведения микроструктуры состаренных сплавов, изучалась также их радиационная повреждаемость. Было установлено, что присутствующие в сплавах частицы интерметаллидной фазы существенно влияют на поведение точечных дефектов. Была изучена зависимость этого эффекта от условий облучения (температуры, дозы), а также от типа, размера

и плотности частиц [23]. Также изучалось влияние частиц на взаимодействие точечных дефектов с дислокациями [24].

Параллельно с этим на спектрометре УКАИ продолжались работы по изучению накопления дефектов при электронном и нейтронном облучении никеля. Были выявлены особенности дефектной структуры, проявляющиеся при каскадном облучении, в частности образование тетраэдров дефектов упаковки. Эти результаты вызывают большой интерес у исследователей со всего мира.

А.П. Носов, В.Б. Выходец, В.Л. Арбузов, С.Е. Данилов, А.П. Дружков

Список литературы

1. Трапезников Виктор Александрович: Библиограф. указ., Ижевск (2015), 80 с.
2. В.А. Трапезников, А.В. Евстафьев, В.П. Сапожников и др., ФММ **36**, 1293 (1973).
3. Отчёт о НИР «Создание рентгеновского электронного спектрометра с высоким энергетическим разрешением «Электронный магнитный спектрометр ЭС ИФМ-3» 30.12.1982, № гос. рег. 78063338.
4. Отчёт о НИР «Создание электронного магнитного спектрометра ЭС ИФМ-4» 30.12.1985. № гос. рег. 81024484.
5. I.V. Gribov, V.I. Osotov, A.P. Nosov et. al., J. Appl. Phys. **115**, 193909 (2014).
6. G. Sreenivasulu, P. Qu, E. Piskulich, et. al., Appl. Phys. Lett. **105**, 032409 (2014).
7. J. More-Chevalier, U. Lüders, C. Cibert, et. al., Appl. Phys. Lett. **107**, 252903 (2015).
8. Yu.P. Sukhorukov, A.V. Telegin, A.P. Nosov, et. al., Superlat. Microstruct. **75**, 680 (2014).
9. A. Nosov, A. Rinkevich, V. Vassiliev, et. al., Thin Solid Films **517**, 2979 (2009).
10. В.Б. Выходец, Т.Е. Куренных, А.А. Фотиев, В.А. Павлов, Письма в ЖЭТФ **58**, 421 (1993).
11. A. Fishman, T. Kurennykh, V. Vykhodets et. al., in *Advances in Ceramics – Characterization, Raw Materials, Processing, Properties, Degradation and Healing*, InTech, Rejeka (2011), p. 139.
12. V.B. Vykhodets, T.E. Kurennykh, O.A. Nefedova et. al., Solid State Ionics **263**, 152 (2014).
13. V.B. Vykhodets, E.A. Jarvis, T.E. Kurennykh et. al., Surface Science **644**, 141 (2016).
14. V. Vykhodets, T. Kurennykh, N. Tarenkova, in *Titanium Alloys – Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications*, InTech, Rejeka (2012), p. 43.
15. В.Л. Арбузов, С.Е. Данилов, А.П. Дружков et. al., Mater. Sci. Forum, **97–99**, 317 (1992).
16. V.L. Arbuzov, S.E. Danilov, A.P. Druzhkov, Phys. Stat. Sol. (a) **162**, 567 (1997); В.Л. Арбузов, С.Е. Данилов, А.П. Дружков, ФММ **84**, 394 (1997).

17. V.L. Arbuzov, A.P. Druzhkov, S.E. Danilov, J. Nucl. Mater. **295**, 273 (2001); V.L. Arbuzov, G.A. Raspopova, S.E. Danilov et. al., J. Nucl. Mater. **283–287**, 849 (2000).
18. S.E. Danilov, V.L. Arbuzov, V.A. Kazantsev, J. Nucl. Mater. **114**, 200 (2011).
19. A.P. Druzhkov, S.E. Danilov, D.A. Perminov et. al., J. Nucl. Mater. **476**, 168 (2016).
20. A.P. Druzhkov, D.A. Perminov, V.L. Arbuzov et. al., J. Phys.: Condens. Matter. **16**, 6395 (2004).
21. А.П. Дружков, Д.А. Перминов, Н.Н. Степанова, ФТТ **52**, 1873 (2010).
22. A.P. Druzhkov, D.A. Perminov, Mater. Sci. Eng. A **527**, 3877 (2010).
23. A.P. Druzhkov, D.A. Perminov, N.L. Pecherkina, Phil. Mag **88**, 959 (2008).
24. A.P. Druzhkov, V.L. Arbuzov, D.A. Perminov, J. Nucl. Mater. **341**, 153 (2005).

ЛАБОРАТОРИЯ

низких температур

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Марченков Вячеслав Викторович, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.
- Акулина Юлия Болотбековна, старший лаборант
- Вишняков Андрей Алексеевич, инженер-исследователь
- Волкова Наталья Владимировна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Дякина Вероника Павловна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Емельянова Сабина Михайловна, младший научный сотрудник
- Козлов Виктор Андреевич, главный специалист-советник, д.мед.наук, профессор
- Коуров Николай Иванович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Никонорова Зинаида Ивановна, ведущий документовед
- Перевозчикова Юлия Александровна, младший научный сотрудник
- Подгорных Сергей Михайлович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Прекул Александр Федосиевич, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Угрюмова Наталья Андреевна, научный сотрудник
- Чистяков Василий Владимирович, инженер
- Щеголихина Наталия Ивановна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Тематика лаборатории в целом связана с изучением электронной структуры, электротранспортных, магнитотранспортных и тепловых свойств металлических, полуметаллических и металлооксидных материалов, плёнок и наноструктур на их основе.

1. Заведующий лабораторией Волкенштейн Нахим Вениаминович,

д.ф.-м.н., профессор (при назначении: с.н.с., к.ф.-м.н.,
возраст 41 год), возглавлял ЛНТ 32 года с 1954 по 1986 гг.

Лаборатория низких температур организована в соответствии с постановлением Президиума АН СССР от 23.04.1954 г. и решением Президиума УФАН от 24.05.1954 г. (за подписью академика И.П. Бардина) в составе Института физики металлов. Инициатором создания лаборатории выступил академик С.В. Вонсовский, поддержанный академиками П.Л. Капицей (Институт физических проблем АН СССР, Москва) и Б.Г. Лазаревым (Харьковский институт физических проблем [1]). Создание лаборатории было продиктовано необходимостью расширения диапазона исследований свойств твёрдых тел на область низких и сверхнизких температур. Организа-



Н.В. Волкенштейн

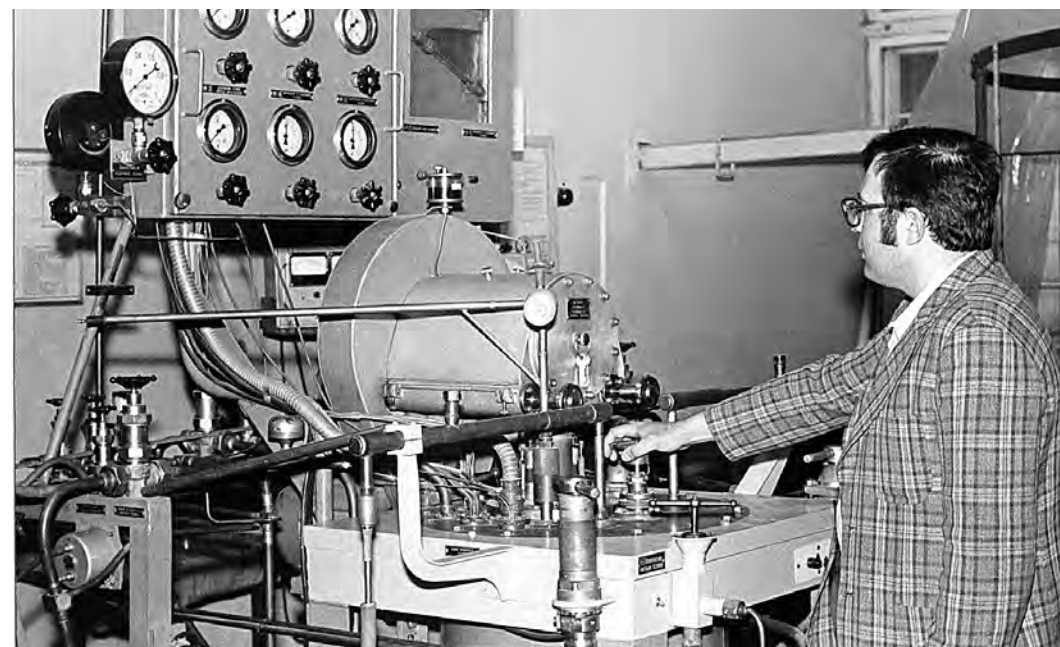
ция экспериментальной базы и формулировка научной тематики были поручены старшему научному сотруднику института к.ф.-м.н. Нахиму Вениаминовичу Волкенштейну (НВВ) (в то время ещё достаточно молодому человеку – ему тогда был 41 год). В дальнейшем он вплоть до 1987 г. был бессменным руководителем и инициатором многих научных работ «нахимовцев» (как в шутку называли себя сами сотрудники лаборатории).

Прежде чем приступить к изложению творческих достижений НВВ в избранном им деле жизни, напомним основные этапы его биографии [2, 3].

В 1937 г. НВВ окончил инженерно-физический факультет Ленинградского политехнического института и затем два года руководил рентгеновской лабораторией на Лысьвенском металлургическом заводе. В 1939 г. он поступил в аспирантуру Института физики металлов УФАН. Однако учёба была прервана Великой Отечественной Войной. НВВ участвовал в боях на Ленинградском фронте, был командиром минометного взвода, удостоен 11 боевых наград. После тяжелого ранения он был комиссован из армии и вернулся к научной работе. С 1943 по 1949 гг. был учёным секретарем института. Закончил аспирантуру и в 1947 г. защитил кандидатскую диссертацию по изучению гальваномагнитных свойств упорядочивающихся сплавов. Забегая хронологически вперед, отметим, что докторская диссертация, блестяще защищённая им в 1966 г. по гальваномагнитным свойствам и их связи с электронной структурой чрезвычайно актуальных тогда редкоземельных металлов, была выполнена им полностью уже на оборудовании лаборатории низких температур (ЛНТ). Исследования электро- и теплофизических свойств РЗМ в то время были новаторскими, получили всеобщее признание и были удостоены диплома ВДНХ СССР в 1968 г. (совместно с Г.В. Федоровым и В.Е. Старцевым).

Итак, в 1954 г. приказом по институту НВВ был назначен заведующим лабораторией низких температур и приступил к её созданию. Эту лабораторию НВВ возглавлял с 1954 по 1986 г. Отметим, что из материально-технической базы к лаборатории отошла установка по получению сжиженного азота для нужд института и обслуживающая её бригада аппаратчиков во главе И.П. Перминовым¹ Проблема «добычи» различного рода комплектующих и оборудования для создания гелиевой и водородной установок полностью лежала на НВВ. Кроме того, он проходил стажировку в Харьковский физико-технический институт (ХФТИ), чтобы освоить новые конструкции приобретаемых оживительных аппаратов. В монтаже оборудования активно участвовали Г.Г. Стафеев, В.В. Старицын, В.Л. Лемеш, которые получили практические навыки в работе с оживительными машинами в Институте физических

¹ Участник боев с Японией в 1941–1945 гг.



Гелиевая оживительная станция на базе Г-3 (у пульта управления Лемеш В.Л.).

проблем в Москве под руководством Фрадкова². В мае 1955 г. в ИФМ был запущен водородный оживитель (получены поздравления от Капицы, Фрадкова, Малкова). В январе 1957 г. запущен гелиевый оживитель (поздравительная телеграмма от П.Л. Капицы). В дальнейшем интервал низких температур от 2,3 до 0,38 К был расширен за счёт откачки сверхтекучего ³He (на установке конструкции ХФТИ Есельсона, Лазарева, Швеца). К 60-м годам жидкий гелий становится доступным многим подразделениям Института и города. Таким образом, в те далекие годы Урал стал крайним восточным регионом СССР, где было налажено производство жидкого гелия и водорода для проведения физических экспериментов при низких температурах.

Большую помощь НВВ оказывал в создании криогенной (гелиевой) базы в УПИ и УрГУ и в организации кафедры физики низких температур в Уральском госуниверситете, где он был профессором с 1976 г. и читал курс лекций «Физика и техника низких температур». Нужно отметить, что он всегда поддерживал тесную связь с заведующими этой кафедрой профессорами Леонидом Яковлевичем Кобелевым и Алексеем Николаевичем Бабушкиным (отметим, что последний в годы учёбы в вузе проходил практику, выполнял курсовые и дипломную работу в ЛНТ ИФМ).

² Технические характеристики оживительных машин приведены в Приложении

С кого начиналась «научная команда» лаборатории? Прежде всего, это:

1. Зав. лаб. – с.н.с., к.ф.-м.н. Нахим Вениаминович Волкенштейн, 1954.
2. С.н.с., к.ф.-м.н. Георгий Вениаминович Федоров, 1954.
3. С.н.с., к.ф.-м.н. Тарас Дмитриевич Зотов³, 1954.
4. М.н.с. Эмма Васильевна Галошина, 1958 (после окончания аспирантуры).

В то время столы стояли в рабочем кабинете (к. 34 корп. III) в форме каре. Сотрудники сидели лицом друг к другу, поэтому зав. лаб. всегда мог видеть степень бодрствования и мыслительного процесса сотрудников. Когда лаборатория стала прирастать площадями, у заведующего появился свой кабинет, куда он мог вызывать «на ковёр» или принимать вновь поступающих на работу. Увеличение штата сотрудников можно проследить по Списку сотрудников в Приложении.

Вместе с созданием экспериментальной базы и увеличением штата научных сотрудников шло формирование и развитие научной тематики лаборатории под общим девизом: «Электронные свойства переходных металлов и сплавов». В становлении тематики принимали участие:

- Г.В. Федоров – исследование гальваномагнитных свойств ферромагнитных металлов и их сплавов;
- Т.Д. Зотов – изучение магнитных свойств ферромагнитных металлов и соединений;
- М.И. Турчинская – исследование явления однонаправленной анизотропии;
- Э.В. Галошина, Н.И. Щеголихина – изучение восприимчивости и её анизотропии в d-металлах;
- В.Е. Старцев, В.А. Новоселов, В.П. Дякина, А.Н. Черепанов, В.И. Черепанов, В.В. Марченков – исследование кинетических свойств особоцистых монокристаллов d- и f (РЗМ)- металлов и выявление их особенностей, обусловленных топологией поверхности Ферми;
- А.Ф. Прекул – магнитные свойства сверхпроводников второго рода, систематика диаграмм ТС – состав сверхпроводящих сплавов;
- Ю.Н. Циовкин – разбавленные растворы 3d-, 4d- металлов в платине (электрические, магнитные и тепловые свойства);
- А.Ф. Прекул, А.С. Щербаков, В.А. Рассохин, С.В. Ярцев, Э.Г. Валиулин – изучение концентрационных переходов типа «металл-полупроводник (диэлектрик)» в растворах d-металлов;

³ Участник ВОВ на Прибалтийском фронте.

- Ю.Н. Циовкин, Н.И. Коуров, С.М. Подгорных, Л.А. Угодникова, С.Ф. Савченкова – восстановление фазовых диаграмм магнитного состояния для растворов «ферромагнетик-антиферромагнетик»;
- А.С. Щербаков, Э.Г. Валиулин, Д.Н. Коуров – исследование СВЧ-свойств металлооксидных соединений (высокотемпературных сверхпроводников).

Большое значение для выполнения намеченных исследований имело создание в конце 60-х годов Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (МЛ СМП и НТ) во Вроцлаве (Польша), возглавляемой в те годы сотрудником Института физических проблем АН СССР, чл.-корр. АН СССР Н.Е. Алексеевским. Многие сотрудники лаборатории один-два раза в год, начиная с 1975 г. (А.Ф. Прекул, В.Е. Старцев, В.А. Рассохин, А.С. Щербаков, А.Н. Черепанов, Н.И. Коуров, В.В. Марченков, Э.Г. Валиулин, П.Р. Кумин), проводили там длительные (до 2-х месяцев) научные исследования. К сожалению, с 2016 г. РАН перестала финансировать работу российских учёных в этой лаборатории. Последним из наших сотрудников там работал В.В. Марченков в 2016 г. Нужно отметить, что В.Е. Старцев работал полгода в Канаде по приглашению Национального исследовательского совета в университетах Торонто и Кингстона в 1982 г., зарекомендовав себя на международных конференциях по физике переходных металлов с 1977 по 1980 гг. Длительную стажировку по обмену научными кадрами (1979–1980 гг.) в университетах США проходил А.Ф. Прекул в Индианском университете (г. Блумингтон) и в Калифорнийском университете (г. Сан-Диего). В.А. Рассохин и А.С. Щербаков проводили теплофизические исследования в Институте физики твёрдого тела в г. София (Болгария) в 1982 г. С 1992 г. по настоящее время В.В. Марченков проводит совместные научные исследования с коллегами из Атоминститута Австрийских университетов г. Вена (Австрия). Так наши сотрудники укрепляли свой научный статус на международной арене.

В 2013 г. в ИФМ была организована выставка научных работ, посвященная 100-летию со дня рождения Нахима Вениаминовича. Работы на ней были представлены по тематикам и наиболее полно отражали направления исследований под его руководством.

Тематика научно-исследовательских работ в период с 1955 по 1986 гг.

- Локальные особенности поверхностей Ферми и тепловой пробой.
- Локальные особенности поверхностей Ферми и магнитный пробой.
- Топология ПФ и размерный эффект в электросопротивлении.
- Механизмы рассеяния носителей заряда в переходных металлах.

- Свойства металлов в условиях статического скин-эффекта.
- Исследование свойств редкоземельных металлов.
- Парамагнитная восприимчивость переходных металлов.
- Электронная структура и сверхпроводимость.
- Сплавы с концентрационным фазовым переходом.
- Разбавленные растворы переходных металлов в платине.
- Электронный фазовый переход и аномалии решёточных свойств в титановых сплавах.
- Влияние гидрирования на свойства сплавов на основе палладия.
- Явление однонаправленной анизотропии.

Под руководством НВВ защищены 3 докторских и 26 кандидатских диссертаций.

НВВ внёс существенный вклад в физику твёрдого тела. Благодаря высокой эрудиции и компетентности он был членом Совета АН СССР по проблеме «Физика низких температур». Принимал активное участие в работе и в организации Совещаний по физике низких температур.

НВВ являет собой пример беззаветного служения избранной им области физики – физике низких температур, всячески способствовал поддержанию экспериментальной базы лаборатории в рабочем состоянии. В памяти коллег он остаётся человеком неистощимой работоспособности, удивительной общительности, доброты и справедливости. Много лет он был председателем товарищеского суда в институте.

Таким образом, НВВ в ИФМ с 1939 г. (с перерывами), с 1943 г. – н.с. лаборатории фазовых превращений, потом учёный секретарь института, а затем более тридцати лет (с 1955 по 1986 гг.) – руководитель лаборатории низких температур (своего главного детища); с 1986 по 1990 гг. оставался ведущим научным сотрудником. В 1990 г. он ушёл на пенсию в возрасте 77 лет.



В.Е. Старцев

2. Заведующий лабораторией Старцев Владимир Ермолаевич,

д.ф.-м.н., профессор (при назначении: с.н.с. д.ф.-м.н., возраст 48 лет), возглавлял ЛНТ и отдел электронных свойств 10 лет: с 1986 по 1997 гг.

Владимир Ермолаевич Старцев (ВЕС) окончил физфак УрГУ в 1962 г. и был принят в ИФМ в лабораторию низких температур. Здесь он прошёл тернистый путь от старшего лаборанта до заведующего научным отделом. ВЕС защитил кандидатскую диссертацию в 1968 г. и докторскую – в 1986 г. В августе 1986 г. он был назначен заведующим отделом электронных свойств в составе лабораторий низких температур и кинетических явлений. ВЕС руководил отделом до октября 1997 г., когда



В.Е. Старцев в Канаде (работа в университете в Торонто в 1982 г.).

был освобождён от должности в связи с созданием нового отдела электронных свойств, состоящего из лабораторий низких температур, кинетических явлений, электрических явлений, полупроводников и полуметаллов с новым заведующим отделом – чл.-корр. РАН Устиновым Владимиром Васильевичем. В 2000 г. отдел электронных свойств был исключен из структуры ИФМ.

Творческий период ВЕС достаточно полно отражён в Сборнике материалов «Физика металлов на Урале», посвящённом 80-летию Института физики металлов, в статье «Владимир Ермолаевич Старцев: фермиология жизни» [4]. Но вернёмся к периоду, когда он руководил лабораторией низких температур.

В плане руководства лабораторией ВЕС достался тяжёлый период времени. Во-первых, это было связано с переездом лаборатории летом 1989 г. из старого III-го корпуса в новый корпус А, который сопровождался разрушением и выходом из строя некоторых экспериментальных установок, что требовало их восстановления. А во-вторых, начинался поток всеобщей перестройки в стране и огромные трудности выживания самого института в те, как говорили, «лихие» годы.

Внутри лаборатории в 1992 г. тоже произошли изменения. Станция получения жидкого гелия была выделена из состава лаборатории в самостоятельную структурную единицу института под наименованием «криотехнологический центр» со своими правилами предоставления хладагентов потребителям. Руководителем криотехнологического центра был назначен в.н.с., д.ф.-м.н. Александр Федосиевич Прекул. Такое изменение структуры полностью нарушало целостность лаборатории, задуманную создателями

ЛНТ. Криотехнологический центр в таком виде просуществовал с 1992 по 2004 гг.

Тематика научно-исследовательских работ, которая сформировалась при НВВ ещё до 1986 г., продолжала успешно развиваться и в дальнейшем под руководством ВЕС. Главным и важным при этом являлось наличие «высококвалифицированных» кадров, защитивших диссертации в 70–80 г. (см. Приложение) и не покинувших лабораторию. Отметим, что за годы нахождения лаборатории в корпусе А было защищено, к сожалению, не очень много диссертаций, так как сказался большой отток сотрудников во второй половине 90-х гг.

Тематика ЛНТ в период с 1986 по 1997 гг.

- Влияние локальных особенностей поверхностей Ферми на электронные свойства в особочистых монокристаллах переходных металлов (W, Mo, Ru, Re, Os, Ta, Nb) в условиях статического скин-эффекта (ССЭ) в сильных магнитных полях и при низких температурах. Исследование ССЭ при больших плотностях электрического тока. Нелинейные вольт-амперные характеристики в чистых металлах при ССЭ.
- Количественный анализ явления температурного (фононного) пробоя в высокополевого магнитосопротивлении компенсированных металлов. Изучение влияния поверхностного и дефектов приповерхностного слоя на гальваномагнитные свойства, эффект Холла, магнитотермоэдс и эффект Нернста-Эттингсгаузена.
- Влияние механизмов межлистного электрон-фононного рассеяния и рассеяния электрон-фонон-поверхность на низкотемпературные кинетические свойства.
- Получение и аттестация особочистых монокристаллов переходных металлов продолжала оставаться одной из главных проблем для решения поставленных задач фермиологии.
- В ВТСП (керамические сверхпроводники): началось изучение магнитострикции и теплового расширения, сегнетоэлектрических аномалий, особенностей магнитных свойств смешанного состояния и релаксационных явлений (эффект Мейсснера), аномальной дисперсии поверхностного импеданса и отрицательной диэлектрической проницаемости.
- Сплавы с конкурирующим обменным взаимодействием, упорядочивающиеся сплавы. Исследование фазовых диаграмм магнитного состояния (Обзор и классификация).
- Электросопротивление и термоэдс зонных магнетиков.
- Электронная и кристаллическая структура высокоомных сплавов переходных металлов.
- Синтез квазикристаллов Al–Cu–Fe, электрические свойства и оптические свойства.

- Оптические, электрические и электронные характеристики сплавов Гейслера.
- Тепловое расширение инварных сплавов.
- Влияние водорода (гидрирования) на электронную структуру, электрические и магнитные свойства сплавов на основе Pd и Pt. Сплавы и материалы для водородной энергетики на основе Pd.
- Исследовано влияние режимов охлаждения в магнитном поле на намагниченность монокристаллов манганита лантана (Исследования в МЛСМП и НТ в Польше).
- Теоретически изучено поведение электропроводности и диэлектрической проницаемости в перколяционных системах. Рассмотрена прыжковая проводимость во фрактальных структурах.

Работа В.В. Марченкова, В.Е. Старцева, А.Н. Черепанова 1993 г. «Экспериментальное обнаружение экспоненты Пайерлса в магнитосопротивлении переходных металлов» признана лучшей работой года института по проблеме «Электронные свойства металлов».

Работа А.Б. Батдалова, А.Н. Черепанова, В.Е. Старцева, В.В. Марченкова 1993 г. «Тепловой аналог статического скин-эффекта в компенсированных металлах в сильных магнитных полях» вошла в отчёт РАН Правительству России.

Выполнен один из первых проектов РФФИ 93-02-2808 «Неупорядоченные магнитные системы и природа магнитоупругих взаимодействий в инварных сплавах» (С.М. Подгорных).

ВЕС, А.Н. Черепанов и В.В. Марченков (с 1986 г. по 1998 г.) неоднократно работали в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур и в Институте низких температур и структурных исследований ПАН (г. Вроцлав, Польша).

3. Заведующий лабораторией Архипов Валентин Егорович

(при назначении на должность: д.ф.-м.н.,
зам. директора института по науке, возраст 56 лет),
и.о. зав. лаб. в 1997 г.

С мая 1998 г. возглавлял ЛНТ в течение 14 лет:
с 1998 по 2012 гг.

Валентин Егорович Архипов (ВЕА) окончил физический факультет Уральского государственного университета им. А.М. Горького в 1965 г. Два последних года обучения стажировался в Москве и Дубне по нейтронным исследованиям твёрдого тела. Вернувшись на Урал, работал в лаборатории радиационной физики и нейтронной спектроскопии. В дирекции института в те непростые годы он много внимания уделял вопросам упо-



В.Е. Архипов

рядочения экономической деятельности, следил за соблюдением коммерческих интересов института. После защиты докторской диссертации в 1997 г. совмещал работу в дирекции с руководством лабораторией низких температур. В 2000 г. прежний Отдел электронных свойств, в который входила ЛНТ, был исключён из структуры института и в связи с этим вплоть до 2006 г. ЛНТ снова входила отдельной лабораторией. Затем в 2007–2008 гг. образовался Отдел физики низких температур в новом составе из трёх лабораторий: ЛНТ, лаборатории медицинских материалов и криотехнологий (зав.лаб., д.м.н В.А. Козлов), и лаборатории неравновесных процессов и структур (зав.лаб., к.ф.-м.н. В.Б. Выходец). После ряда структурных преобразований в достаточно короткий промежуток времени (~2012–2015 гг.) в ИФМ под руководством академика В.В. Устинова сформировался Отдел наноспинтроники, в который в настоящее время входит 8 лабораторий, в том числе и лаборатория низких температур.

Тематика ЛНТ в период с 1998 по 2012 гг.

- ВЕА внёс в тематику лаборатории вопросы из комплексной Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН «Новые материалы и структуры», которая продолжалась до 2009 г. В 2009 г. была получена заявка на новую трёхлетнюю Программу ОФН РАН «Физика новых материалов и структур» на 2009–2011 гг.
- Под руководством ВЕА в 2005–2012 гг. проводились исследования под общим названием «Физические свойства плутоний-галлиевых сплавов в наноструктурном состоянии, созданном самооблучением». Работы, как правило, проводились в рамках проектов, совместных с Уральским отделением РАН. По планам этих Программ были исследованы магнитные свойства и ЯМР (совместно с криомагнитным центром и лаб. кинетических явлений) плутоний-галлиевых материалов различного концентрационного состава и с различными сроками сохранения образцов («состаренные сплавы»). В дальнейшем подробно исследовались также и свежеприготовленные материалы (время сохранения которых ≤ 1 года) и длительно (свыше 10 лет) сохраненные плутоний-галлиевые сплавы, относящихся по концентрации галлия к области существования дельта-фазного структурного состояния.
- Выяснено влияние перехода материала с течением времени в наноструктурное состояние на распределение галлия в сплавах, кристаллическую, электронную и магнитную структуры сплавов.
- Методами дифракции рентгеновских лучей и тепловых нейтронов исследованы особенности структурного состояния манганитов лантана со стронцием и фазовые превращения, индуцированные облучением быстрыми

нейтронами. Установлен определяющий тип дефектов в монокристаллах манганитов лантана, облучённых быстрыми нейтронами ($E \geq \text{МэВ}$) и его роль в формировании изменений физических свойств (эффект «колоссального» магнитосопротивления, переход металл-диэлектрик).

- Исследовано влияние дефектов атомного масштаба, создаваемых облучением высокоэнергетическими частицами (быстрыми нейтронами) и термообработкой, на физические свойства периодических (монокристаллы чистых металлов, манганиты лантана) и аperiodических (икосаэдрические фазы Al–Cu–Fe) кристаллов. Показано, что несовершенства дальнего порядка в икосаэдрических сплавах Al–Cu–Fe являются электрически заряженными центрами. Их наличие обуславливает особенности в поведении дилатометрических, транспортных и магнитных свойств.
- Установлено, что существенные изменения гальваномагнитных свойств и эффекта де Гааза-ван Альфена особо чистых монокристаллов вольфрама и молибдена, облученных 5 МэВ электронами и 305 МэВ ионами криптона, связаны с увеличением эффективной массы электронов проводимости.
- Показано, что размерный эффект в высокополевой магнитопроводимости чистых компенсированных металлов ($4,2 < T < 50 \text{ K}$, $H \leq 15 \text{ T}$) может быть использован для разделения и изучения поверхностного и объемного вкладов в магнитосопротивление чистых и дефектных кристаллов.
- В рамках программы, связанной с новыми принципами и методами направленного синтеза веществ с заданными свойствами, исследованы псевдобинарные сплавы Гейслера с особенностями кристаллической структуры и состава. Установлено, что аномалии в поведении оптических и электрических свойств обусловлены формированием псевдощели в плотности электронных состояний вблизи уровня Ферми при изменении состава сплава.

Выполнены проекты, гранты и хоздоговоры:

1. Грант РФФИ № 02-02-16425 (2002–2004 гг.) «Влияние дефектов атомного масштаба, создаваемых облучением быстрыми нейтронами, на физические свойства слоистых манганитов лантана».
2. Грант РФФИ № 02-02-16425 (2002–2004 гг.) «Влияние дефектов атомного масштаба, создаваемых облучением быстрыми нейтронами, на физические свойства слоистых манганитов лантана».
3. Грант РФФИ № 02-02-16431 (2002–2004 гг.) «Новый метод исследования радиационных дефектов в чистых металлических монокристаллах».

4. Грант РФФИ № 99-02-16280 (1999–2001 гг.) «Электронные свойства и структура моно- и поликристаллических оксидных и халькогенидных соединений 3d- и 4f- металлов в дефектном состоянии, вызванном облучением».
5. Хоздоговор № 3/98 (1998 г.) с Российским научным центром «Курчатовский институт» (Москва) «Исследование физических свойств монокристаллов манганитов лантана в сильных магнитных полях».
6. Проект Международного технического центра (МНТЦ) № 467 (совместно с лабораторией радиационной физики и нейтронной спектроскопии) (1998 г.).

При ВЕА в ЛНТ начались исследования манганитов, которые практически прекратились с его уходом из лаборатории. В качестве объектов исследования из предыдущих лет остались квазикристаллы, сплавы Гейслера, сплавы с ЭПФ.

4. Зав. лабораторией Марченков Вячеслав Викторович

(при назначении на должность: в.н.с., д.ф.-м.н., возраст 51 год),
возглавляет ЛНТ с 2012 г. по настоящее время

Вячеслав Викторович Марченков (ВВМ) окончил физико-технический факультет Уральского политехнического института им. С.М. Кирова (1984 г.). С 1983 г. работает в Институте физики металлов, где прошел путь от лаборанта до заведующего лабораторией. В 1988 г. защитил кандидатскую, а в 2001 г. докторскую диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Научные интересы В.В. Марченкова связаны, главным образом, с синтезом и изучением электронных транспортных и магнитных свойств объемных и квантово-размерных металлических,

полупроводниковых и оксидных систем. Цель таких исследований – поиск и исследование новых электронных эффектов, а также возможностей их практического применения. Как специалист в этой области ВВМ широко известен в нашей стране и за рубежом. Он является автором около 100 научных работ, опубликованных в научных журналах, индексируемых в системе Web of Science. Результаты его работ докладывались и обсуждались на престижных семинарах и конференциях, в частности, он неоднократно выступал с приглашенными и пленарными докладами на крупных международных конференциях и во многих ведущих научных центрах. ВВМ является одним из авторов классических экспериментов по доказательству существования в чистых металлах статического скин-эффекта, температурного (фононного) и дислокационного (деформационного) пробоев.



В.В. Марченков



Коллектив лаборатории в 2013 г.

В качестве приглашенного учёного ВВМ неоднократно выполнял совместные научные исследования с зарубежными коллегами из Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (Польша), Атоминститута Технического университета Вены (Австрия), Национальной лаборатории сильных магнитных полей (США), Хубейского университета (Китай), Национального университета Чен-Кунга (Тайвань) и многих других научных центров.

В.В. Марченков сочетает свою научную работу с научно-организационной и преподавательской деятельностью. С 2010 г. он является учёным секретарем Объединённого учёного совета по физико-техническим наукам УрО РАН, с 1992 г. – членом редколлегии журнала «Физика металлов и металловедение». С 2014 г. он является профессором УрФУ, постоянно руководит работой бакалавров, магистрантов и аспирантов, разработал и читает различные спецкурсы для аспирантов, студентов и магистрантов УрФУ, а также в университетах Китая, Тайваня и Австрии. ВВМ принимает участие в организации и проведении российских и международных научных школ, конференций. Является лауреатом премии Фонда содействия отечественной науке (2003 и 2005 гг.) в номинации «Молодые доктора наук».

Тематика научных работ в 2012–17 гг. претерпела изменения в связи с пополнением состава лаборатории за счет новых молодых сотрудников, а также с получением новых грантов по новым перспективным направлениям научных исследований. С 2012 по 2017 гг. учебную, научно-исследовательскую и преддипломную практику в ЛНТ прошло более 20 студентов, а четверо из них поступили в очную аспирантуру к В.В. Марченкову.

Тематика ЛНТ в период с 2012 по 2017 гг.

- Изучение сплавов с большим магнитокалорическим эффектом структурными, магнитными и электрическими методами (совместно с Хубейским университетом, г. Ухань, Китай и Атоминститутом, г. Вена, Австрия).
- Влияние термобарической обработки сплавов Гейслера на магнитокалорический эффект (совместно с Атоминститутом, г. Вена, Австрия и ИХТТ УрО РАН).
- Оценка влияния различных механизмов проводимости на магнитосопротивление манганитов лантана с активационным типом проводимости. Связь колоссального магнитосопротивления с неоднородностями магнитного упорядочения. Энтропийный вклад в термоэдс легированных манганитов лантана (совместно с криомагнитным центром и лабораторией теоретической физики ИФМ УрО РАН).
- Электронные, электрические, оптические, магнитные и гальваномагнитные свойства полуметаллических ферромагнитных сплавов Гейслера. Влияния малых вариаций содержания Fe и Al на проводимость, магнетизм и низкотемпературные аномалии термоэдс в полупроводниковых сплавах Fe–V–Al вблизи стехиометрического состава. Электрические и магнитные свойства сплавов Гейслера на основе Ni–Mn–X (X = Al, Ga, Ge, In, Sn, Sb, Si) (совместно с лабораториями оптики металлов, полупроводников и полуметаллов, цветных сплавов, криомагнитным центром ИФМ УрО РАН).
- Фазовые и структурные превращения и бароупругие эффекты в сплавах с эффектом памяти формы. Влияние мегапластической деформации на формирование наноструктурных состояний в сплавах Ti–Ni–Fe (совместно с лабораторией цветных металлов ИФМ УрО РАН).
- Микроструктура и свойства высокопрочных сплавов TiCuNi с ЭПФ. Структура и физические свойства быстро закаленных из расплава высокоэнтропийных сплавов (AlCrFeCoNiCu) (совместно с лабораторией цветных металлов ИФМ УрО РАН).
- Влияние легирующих добавок и атомного разупорядочения на физические свойства магнитных сплавов Ni–Mn–Ga с ЭПФ (совместно с лабораторией цветных металлов ИФМ УрО РАН).
- Структурные, оптические и магнитные характеристики наноструктурированного ZnO, CdO и MgO, легированных переходными металлами, полученных по прекурсорной технологии (совместно с ИХТТ УрО РАН).
- Икосаэдрические квазикристаллы: ближний порядок и сингулярности электронной структуры. «Двухуровневые» электронные возбуждения и особенности тепловых, элек-

трических, магнитных и гальваномагнитных свойств. Плоскостные дефекты икосаэдрической фазы.

- Низкотемпературные аномалии теплоёмкости сверхпроводников (давление электронного газа).
- Эффекты спиновой поляризации в квазидвумерном слое HgTe (совместно с лабораторией полупроводников и полуметаллов ИФМ УрО РАН).
- Синтез и исследование структуры, электронного транспорта, гальваномагнитных свойств, ЯМР объёмных и квантово-размерных топологических изоляторов и топологических вейлевских полуметаллов (совместно с Национальным университетом Чен-Кунга, г. Тайнань, Тайвань, лабораторией магнитных полупроводников, Санкт-Петербургским госуниверситетом).

Проекты 2012-2017 гг.:

- Проекты Программ Президиума РАН и УрО РАН: № 12-П-2-1060 (рук. Пушин В.Г., рук.блоков Коуров Н.И. и Марченков В.В.); № 12-Т-2-1011 (рук. Устинов В.В., рук.блока Марченков В.В.); № 12-У-2-1028 (рук. Прекул А.Ф.); № 12-У-2-1036 (рук. Марченков В.В.); 14-2-НП-223 (молодежный проект УрО РАН, рук. Белозерова К.А.); №15-17-2-12 (рук. Марченков В.В.).
- Грант РФФИ № 12-02-00271 «Спиновая и электронная кинетика в сплавах Гейслера и наноструктурах на их основе» (рук. Марченков В.В.).
- Грант РФФИ-MOST, совместный российско-тайваньский грант РФФИ № 14-02-92012 «Синтез и исследование электронной структуры, зарядового и спинового транспорта объёмных и пленочных топологических изоляторов для спинтронных и термоэлектрических устройств» (рук. Марченков В.В.).
- Грант РФФИ № 15-02-06686 «Магнитные и электронные свойства полуметаллических ферромагнитных сплавов Гейслера» (рук. Марченков В.В.).
- Грант РФФИ «Мой первый грант» № 16-32-00072 (рук. Белозерова К.А.).
- Грант РФФИ-MOST, совместный российско-тайваньский грант РФФИ № 17-52-52008 «Синтез, электронная структура, транспортные, магнитные и спинполяризационные характеристики объёмных и тонкоплёночных топологических вейлевских полуметаллов – нового класса квантовых материалов для электроники и спинтроники будущего» (рук. Марченков В.В.).

В.П. Дякина, В.В. Марченков

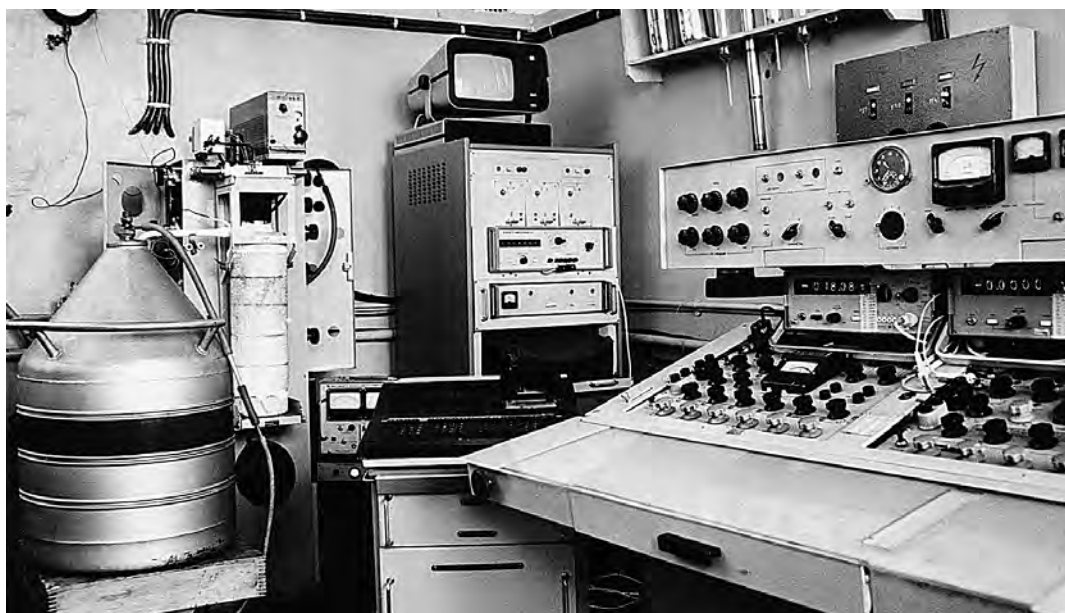
Список литературы

1. Б.Г. Лазарев, в сб. *Развитие криогеники на Украине*, Наукова думка, Киев (1978), с. 76.
2. С.В. Вонсовский, В.Е. Старцев, Ю.Н. Циовкин, газ. «Наука Урала» № 27 (1983).
3. Нахим Вениаминович Волкенштейн (1913–1993). *К 90-летию со дня рождения*, ФММ 96 (2), 30 (2003).
4. В.П. Дякина, В.В. Марченков, А.П. Танкеев, *Физика металлов на Урале*, РИО УрО РАН, Екатеринбург (2012), с.241.

Приложение

Список экспериментальных установок (которые были и есть)

- Прецизионная установка для изучения электро- и магнитосопротивления высокочистых монокристаллических металлов в температурном интервале 0,38–300 К и в магнитных полях до 20 кЭ (1965–68 г.г.; с 1968 г. – при температурах выше 1,8 К). (Решение экспериментальных задач фермиологии до 1988 г.).
- Высокочувствительная установка для измерения магнитной восприимчивости слабомагнитных (диа- и парамагнитных) веществ (магнитные весы) в температурном



Установка для измерения теплоемкости твёрдых тел.

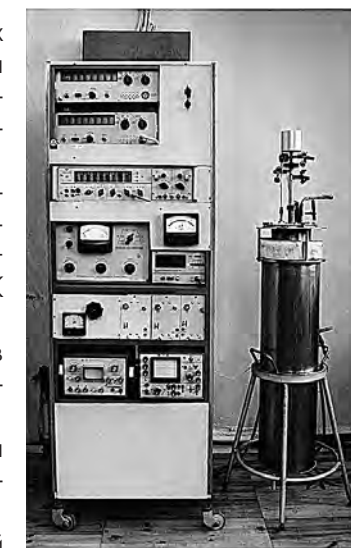
интервале от 78 до 300 К и в магнитных полях до 12 кЭ, включающая возможность измерения угловой зависимости восприимчивости на монокристаллических образцах (с 1967 г. – с модернизациями до 2006 г.).

- Для измерения намагниченности использовались вибромагнитометр (1960–90 г.) и маятниковый магнитометр типа Доменикали (1960–73 гг.) в интервале температур от 4,2 до 300 К и в магнитных полях до 15 кЭ.
- Установка для исследования магнитных свойств сверхпроводников методом теплового размагничивания (1965–70 гг.).
- Автоматизированная универсальная установка для измерения низкотемпературных теплофизических свойств металлов и сплавов (1975–2002 г.г.).
- Струнный магнитометр для измерения магнитной восприимчивости при температурах 4,2–300 К и в магнитных полях до 40 кЭ (1978–92 гг.).
- Установка для исследования скорости и затухания ультразвуковых волн в твердых телах с высокой чувствительностью по скорости УЗВ (1986–88 гг.).
- Емкостной дилатометр ДЕНТ-1 ИФМ для измерения магнитострикции и теплового расширения в широком интервале температур (4,2–300 К) и в магнитных полях до 90 кЭ (1990 г. – с модернизацией по настоящее время).
- Прецизионная автоматизированная установка для исследования кинетических, гальвано- и термомагнитных свойств металлов и металлических соединений в интервале температур от 2 до 120 К и в магнитных полях до 100 кЭ (с 1990 г. по настоящее время с модернизацией).
- Лабораторный металлургический комплекс, включающий две установки: миниатюрную дуговую печь и установку сверхбыстрой закалки металлов и сплавов из жидкой фазы (спиннинг) (с 1988 г. с модернизациями по настоящее время).

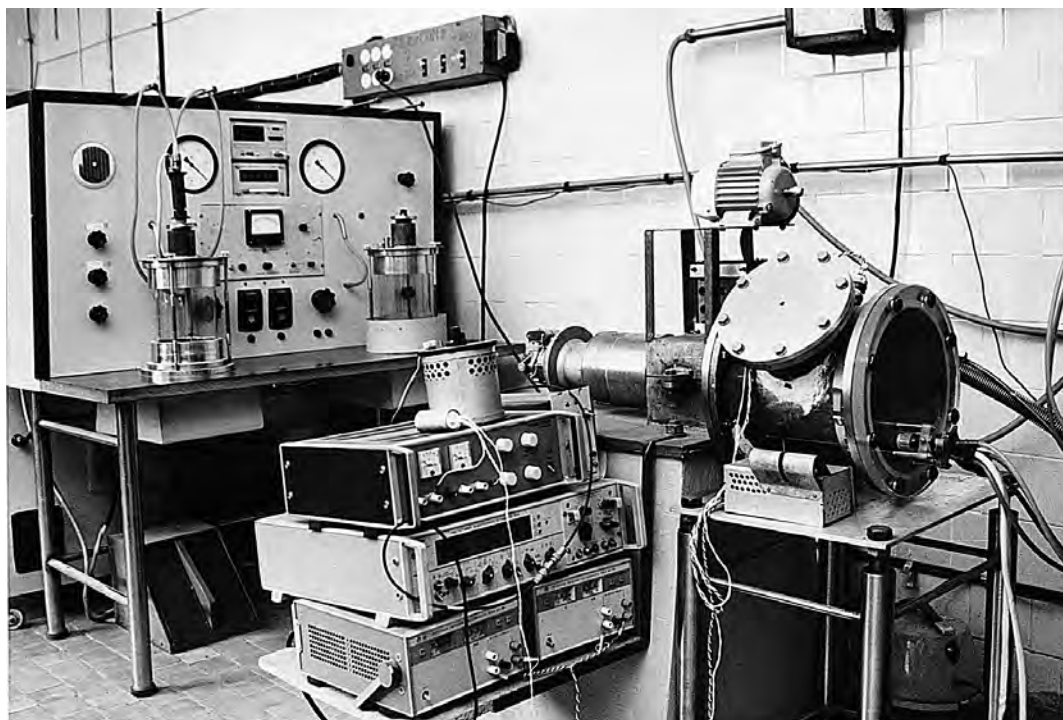
В связи с выделением из состава лаборатории оживительного криотехнологического оборудования в 1992 г. и созданием в институте Центров коллективного пользования оборудованием, а также в связи с изменением состава и числа научных сотрудников и решаемых ими научно-исследовательских задач, оказалось нецелесообразным иметь ряд экспериментальных установок.

В данный момент в лаборатории имеются:

- Установка низкотемпературной дилатометрии, включающая емкостной дилатометр ДЕНТ-1 ИФМ для измерения коэффициента теплового расширения металлических и неметаллических твердых тел на образцах любой фор-



Полуавтоматическая установка для измерения магнитной восприимчивости слабомагнитных веществ (струнный магнитометр).



Установка для сверхбыстрой закалки сплавов из жидкой фазы.

мы и в диапазоне температур от 4,2 до 300 К. Чувствительность dilatометра определяется использованием современного высокоточного емкостного моста АН2550А, что позволяет измерять коэффициент теплового расширения до 10^{-9} K^{-1} на образцах длиной несколько миллиметров. Dilатометр приспособлен для измерений магнитострикции в сверхпроводящем соленоиде в магнитных полях до 8,5 Т при $T=4,2 \text{ K}$.

- Автоматизированные установки электро-, гальвано- и термометрии металлов, сплавов и соединений контактным методом на основе высокоточных цифровых вольтметров и коммутационных блоков фирм Solartron и Kethley. Область использования от 2 до 1200 К в магнитных полях до 8 Т.
- Лабораторный металлургический комплекс, включающий две установки: миниатюрную дуговую печь и установку сверхбыстрой закалки металлов и сплавов из жидкой фазы (спиннинг). Дуговая печь используется для сплавов до 5 г в атмосфере особо чистого аргона с нерасходуемым вольфрамовым электродом и водоохлаждаемым подом. Сверхбыстрая закалка (спиннинг) позволяет получать монокристаллические ленты до 0,5 м с высоким классом чистоты контактной поверхности.

Историческая справка по ожижительным машинам с 1954 по 1989 гг.

- 1-я азотная машина – ЖАК-80 (жидкий азот, кислород; 80 л/ч по кислороду; 20 л/ч по азоту) – с 1955 по 1962 гг.
- 2-я азотная машина – АЖА-004 (40 л/ч по азоту) с 1963 до ~1978 г.

С 1979 г. жидкий азот стали привозить.

- 1-й водородный ожижитель – ВОС-6 (водородная ожижительная станция, 6 л/ч жидкого водорода) – с 1956 по ~1980 гг.
- 2-й водородный ожижитель – (Харьковский) (30 л/ч ж водорода, использовали для охлаждения 2-й ступени в гелиевой ожижительной машине ГС-2).
- 1-я гелиевая машина Г-1 (Моск. завода экспериментального гелиевого машиностроения).
- 2-я гелиевая машина Г-2 (2 л/ч жидкого гелия с водородным циклом 2-й ступени) с 1957 по 1958 гг.
- 3-я гелиевая машина – Г-9 (Харьковская) (9 л/ч жидкого гелия с водородным циклом второй ступени) – до 1967 г.
- 4-я гелиевая машина – Г-3 (детандерная, без водородного охлаждения) – с 1967 по ~1989 г.

После переезда в корп. А в 1989 г.:

- 5-я гелиевая машина – КГУ-500 (турбодетандерная, 2 ступени, 500 Вт холода при 4,2 К по рефрижераторному циклу, проектная производительность 19 л/ч ж гелия. При пуске давала 90 л/ч, затем производительность довели до 130 л/ч). Машина работала всего несколько раз, затем была произведена замена ожижителя на соответствующий от установки КГУ-600.
- 6-я гелиевая машина – КГУ-600 (от нее использовали только ожижитель и заменили им соответствующий ожижитель в КГУ-500). В таком комплекте машину передали в криогенный цех и в такой комплектации она работала далее.

Список научных сотрудников:

- Волкенштейн Нахим Вениаминович (29.06.1943; 1947/1966).
- Фёдоров Георгий Вениаминович (01.06.1947; до 1953).
- Зотов Тарас Дмитриевич (1945; 1949).
- Циовкин Юрий Николаевич (01.09.1954; 1965).
- Турчинская Марина Иосифовна (1960; 1966).
- Галошина Эмма Васильевна (01.11.1958; 1965).
- Старцев Владимир Епмолаевич (01.07.1962; 1968/1986).
- Новоселов Владимир Александрович (1963; 1971).
- Прекул Александр Федосиевич (01.11.1963; 1967/1991).
- Носкова Лариса Михайловна (01.11.1963; 1973).
- Угодникова Людмила Александровна (01.1965; 1971).
- Савченкова Светлана Федоровна (1966; 1972).

- Рассохин Вячеслав Алексеевич (24.08.1972; 1977).
- Щеголихина Наталия Ивановна (01.11.1967; 1973).
- Дякина Вероника Павловна (26.01.1968; 1973).
- Абрамова Людмила Ивановна (1969; 1974).
- Коуров Николай Иванович (20.08.1968; 1975/1996).
- Матвеев Вадим Алексеевич (1970; 1977).
- Щербakov Александр Сергеевич (26.03.1973; 1979).
- Черепанов Владимир Иванович (1973; 1981).
- Черепанов Александр Николаевич (10.11.1976; 1983/1994).
- Ярцев Сергей Владимирович (01.08.1977; 1987).
- Подгорных Сергей Михайлович (06.12.1977; 1984).
- Валиулин Энвер Габдулхакович (12.10.1979; 1986).
- Кумин Петр Рудольфович (13.04.1983; 1990).
- Марченков Вячеслав Викторович (01.10.1983; 1988/2002).
- Поморцев Роберт Викторович (01.07.1986; 1968).
- Рольщиков Александр Борисович (1988; б/с).
- Коуров Дмитрий Николаевич (1990; 1994).
- Волкова Наталья Владимировна (1974; 2005).
- Кузьмин Николай Юрьевич (1998; б/с).
- Угрюмова Наталья Андреевна (2001; б/с).
- Белозерова Клара Алексеевна (2010; б/с).
- Емельянова Сабина Михайловна (01.07.2012; б/с).
- Перевозчикова Юлия Александровна (01.07.2015; б/с).
- Чистяков Василий Владимирович (01.03.2016; б/с).
- Вишняков Андрей Алексеевич (01.07.2016; б/с).

Список ИТР:

- Никонорова Зинаида Ивановна (24.03.1970).
- Перминов Иван Петрович (1946).
- Стафеев Генрих Григорьевич (1957).
- Старицын Виктор Васильевич (09.12.1960).
- Лемеш Валентин Леонидович (03.10.1964).
- Семикатов Владлен Иосифович (23.06.1963).
- Дресвянкин Федор Андреевич (1963).
- Мутовкин Николай Григорьевич (08.02.1967).
- Митягин Владимир Алексеевич (1965).
- Никоноров Виктор Алексеевич (1967).
- Агеева Клавдия Прокопьевна (30.11.1953).
- Брезгин Александр Поликарпович (20.03.1978).
- Брезгин Николай Степанович (01.07.1980).
- Лялин Борис Михайлович (1970).
- Чупин Александр Иванович (15.06.2001).
- Акулин Михаил Евгеньевич (16.04.2013).
- Акулина Юлия Болотбековна (17.10.2016).

Примечание: (в скобках – дата поступления в ИФМ; даты защиты кандидатской/докторской диссертаций или без ученой степени).

ЛАБОРАТОРИЯ

углеродных наноматериалов

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Ринкевич Анатолий Брониславович, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН
- Боголюбский Андрей Сергеевич, инженер-исследователь
- Валиева Рамиля Яхиевна, ведущий конструктор
- Васильев Владимир Юрьевич, ведущий технолог
- Владимиров Александр Борисович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Клепикова Анна Сергеевна, младший научный сотрудник
- Кудинова Галина Михайловна, ведущий технолог
- Кузнецов Евгений Александрович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., доцент
- Неверов Владимир Николаевич, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор РАН
- Пахомов Ярослав Андреевич, младший научный сотрудник
- Перов Дмитрий Владимирович, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Плотников Сергей Александрович, научный сотрудник
- Рубштейн Анна Петровна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Тараканов Валерий Викторович, ведущий электроник
- Шлеенков Семен Александрович, младший научный сотрудник
- Югов Валерий Анатольевич, ведущий технолог

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ углеродных наноматериалов

Лаборатория углеродных наноматериалов (ЛУН) была создана осенью 2013 г. для проведения исследовательских работ в набирающей популярность области физики низкоразмерных модификаций углерода (графен, нанотрубки, фуллерены и др.), получения таких наноматериалов, изучения их транспортных и высокочастотных свойств, применения в устройствах спинтроники. Пункт 1 Приказа № 55 от 03.10.2013 г. по ИФМ УрО РАН гласит: «Вывести лабораторию акустических методов из состава отдела неразрушающего контроля и включить в состав отдела наноспинтроники, переименовав её в лабораторию углеродных наноматериалов». Таким образом, нынешняя лаборатория углеродных наноматериалов создана на базе прежней лаборатории акустических методов. Большинство сотрудников перешли в новую лабораторию. Состав новой лаборатории был значительно усилен группами из других лабораторий. Из лаборатории неравновесных процессов и структур в ЛУН перешла группа, занимающаяся углеродными плёнками и покрытиями. Из лаборатории полупроводников и полуметаллов перешла группа экспериментаторов, специализирующаяся на исследовании гальваномагнитных явлений. Каждая группа имеет свою историю и каждая принесла в новую лабораторию свой научный подход и сложившиеся направления. Они будут кратко изложены в этой главе. Начнём с той группы научных направлений, которая связана с изучением электромагнитных и акустических волн в твёрдых телах и, в частности, в металлах. Научный подход этой группы базируется на фундаментальных идеях профессора К.Б. Власова, в аспирантуру к которому автор этой главы А.Б. Ринкевич поступил в 1973 г.

Электронные явления в металлах при низких температурах

Темой докторской диссертации К.Б. Власова были «Некоторые вопросы теории динамических и квазистатических свойств магнитоупругих сред». Вот как Кирилл Борисович в конце жизни пытался объяснить не физикам, что же им было сделано:

«Кандидатская диссертация у меня была экспериментальная, а докторская – «в стиле Ландау». Сначала я просто предположил, что тензор напряжений может быть несимметричным. И, исходя из несимметричности, как из постулата, построил соответствующую теорию. Многие теории так ведь и строятся: что-то берётся за постулат. А потом додумался, что несимметричность можно вывести из общего закона сохранения момента количества движения у электронов и у элементов объёма твёрдого тела. Сначала, создав теорию про несимметричный тензор напряжений, я даже боялся, как боялся всего нового. И решил обратиться к Л.Д. Ландау. Того в кабинете не было, он «бегал» взад-вперёд по коридору. Я спросил Е.М. Лифшица, можно ли обратиться к Льву Давидовичу, и тот ответил утвердительно. Тогда я «пристроился» к Л.Д. Ландау, стал вместе с ним бегать по коридору и рассказывать свою работу».

Из этого предположения развилось новое направление: теоретическое и экспериментальное изучение поляризационных магнитоакустических явлений в металлах при низких температурах в сильных магнитных полях. Была создана методика измерения этих эффектов, а затем экспериментально обнаружены некоторые из предсказанных явлений. В частности, К.Б. Власовым совместно с учениками развиты феноменологические и микроскопические теории акустических аналогов эффектов Фарадея, Керра, Коттон-Мутона и других специфических для магнитоупругих сред эффектов.

Вот выдержки из доклада А.Б. Ринкевича «Магнитоакустические явления в металлах», сделанного 4 апреля 2000 г. по случаю 80-летнего юбилея К.Б. Власова.

«Магнитоакустические явления претерпели в своём развитии, можно сказать, классический ход развития. Сначала была теория. Занимались этим многие люди, Кирилл Борисович в числе первых получил очень важные результаты. Возможности воплотить свои теоретические разработки по магнитоакустике в жизнь появились у Кирилла Борисовича, когда он стал заведующим лабораторией электрических явлений.

Одна из наших первых работ была посвящена тому, что было обнаружено



К.Б. Власов – заведующий лабораторией электрических явлений, 1986 г.

поглощение поперечного ультразвука в сильном магнитном поле. Простое применение теории говорило, что не должно быть поглощения. Тем не менее, фактически, оно наблюдалось, мы его исследовали и изучили свойства. Только более внимательное рассмотрение деталей поверхности Ферми позволило установить причину поглощения. Объяснение этого феномена принадлежит Кириллу Борисовичу. Оно состоит в том, что важна симметрия поверхности Ферми – отдельных листов, а не кристалла в целом».

В этой части главы использованы материалы, собранные дочерью К.Б. Власова Еленой Кирилловной Костюсовой, за что я ей искренне признателен.

Перечислим основные результаты работ в области электронных явлений в чистых металлах, которые послужили научным заделом для дальнейшего:

- обнаружены и исследованы нелинейные электромагнитные явления, происходящие в чистых металлах под действием сильного импульсного тока: самомодуляция, генерация гармоник, нестационарные явления в амплитуде прошедшей волны;
- экспериментально и теоретически исследовано явление доплер-сдвинутого акустического циклотронного резонанса в чистых металлах и вызванные этим явлением вращение плоскости поляризации и эллиптичность ультразвука;
- обнаружено поглощение поперечного ультразвука в чистых металлах с многосвязной поверхностью Ферми в сильном магнитном поле;
- обнаружено влияние магнитного поля на внутреннюю коиническую рефракцию ультразвука. Это явление экспериментально и теоретически исследовано.

Магнитные металлические наноструктуры

Коллективом исследовательской группы в 1997–2006 гг., были получены результаты, проясняющие природу гигантских аномалий физических свойств перспективного класса материалов – магнитных металлических наноструктур. Одно из наиболее важных направлений, по которому получены новые результаты, относится к исследованию динамики спинов в наноструктурах, для чего особо эффективными оказались высокочастотные электромагнитные методы. В этом перспективном направлении группа занимает ведущее место в России, и её достижения признаны международным научным сообществом. Впервые в широком диапазоне частот выполнены исследования высокочастотных свойств мультислойных металлических наноструктур. Обнаружен высокочастотный аналог гигантского магниторезистивного эффекта (ГМРЭ) [1,2]. Развита методика экспериментального исследования ГМРЭ при протекании высокочастотного тока перпендикулярно плоскости слоёв наноструктуры [3]. Изучено взаимодействие бегущих электромаг-



Во время семинара «Nanostructures-2011» в пос. Ленёвка (слева направо) академик В.В. Устинов, д.ф.м.н. А.П. Носов и д.ф.м.н. А.Б. Ринкевич вместе с нобелевским лауреатом Ж.И. Алферовым

нитных волн с мультислойными наноструктурами Fe/Cr, обладающими гигантским магниторезистивным эффектом. Показано, что высокочастотные токи протекают преимущественно поперёк плоскости слоёв.

Творческое взаимодействие с В.В. Устиновым сыграло ключевую роль в создании и развитии этого направления. По его инициативе и при самом активном участии в лаборатории электрических явлений была создана экспериментальная база, на которой сотрудники Л.Н. Ромашев, М.А. Миляев и другие освоили получение многослойных металлических наноструктур, обладающих гигантским магниторезистивным эффектом.

В дальнейшем продолжились экспериментальные работы по изучению эффекта микроволнового ГМРЭ. Был обнаружен эффект ГМРЭ в отражении волн от наноструктуры. Д.В. Перовым и А.Б. Ринкевичем было развито теоретическое направление, которое позволило выполнить расчёты амплитуд собственных волн в ферромагнитной металлической пластине, и на этой основе количественно рассчитать резонансные и нерезонансные эффекты в прохождении волн сквозь пластину [4].

Вся деятельность в этом направлении, осуществляемая сотрудниками лабораторий электрических явлений и акустических методов, легла в основу крупного проекта («мегагранта»), успешно выполняемого в настоящее время. К деятельности в рамках мегагранта подключились и другие сотрудники, в первую очередь, из лаборатории магнитных полупроводников. В результате в институте создана новая лаборатория квантовой наноспинтроники, которую возглавил известный учёный, профессор С.О. Демокритов из университета г. Мюнстера (Германия). Основная тема



По пути на семинар IWQNS-2016. Смотровая площадка на реке Енисей, август 2016 г. Справа – профессор С.О. Демокритов, слева – зав. лабораторией углеродных наноматериалов А.Б. Ринкевич. Висящие на ограждении замочки как будто символизируют, что судьба в науке накрепко связана с наноспинтроникой

проекта – исследование спиновых волн и спиновых токов в наноструктурах и создание на их основе устройств спинтроники. Выполнение этого проекта очень ощутимо сказалось на всем содержании и темпе научной работы, дало новый импульс развития.

Вот наши основные экспериментальные результаты в области микроволновых исследований металлических наноструктур:

- обнаружен, экспериментально исследован и теоретически объяснён высокочастотный гигантский магниторезистивный эффект в магнитных металлических наноструктурах;
- осуществлено экспериментальное наблюдение высокочастотного гигантского магниторезистивного эффекта в геометрии «ток перпендикулярен плоскости слоёв наноструктуры», экспериментально наблюдался и теоретически объяснён эффект высокочастотного усиления гигантского магниторезистивного эффекта;
- обнаружен микроволновой магниторезистивный эффект в отражении волн от наноструктуры;
- развиты микроволновые методы экспериментального исследования металлических наноструктур.

Магнитные нанокompозиты, метаматериалы

В лаборатории акустических методов проведён цикл исследований электромагнитных свойств 3D-нанокompозитных материалов, содержащих ферро- и ферритмагнитную компоненты. На волнах миллиметрового диапазона установлено существование магнитного антирезонанса [5]. Исследован магнитный резонанс в магнитофотонных кристаллах на основе опаловых матриц

с наночастицами переходных металлов и ферритов. Выполнен анализ процессов взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового диапазона в прямоугольных волноводах и резонаторах с размещёнными внутри пластинами из наноматериалов [6]. Разработан алгоритм, который позволяет восстановить значения комплексной диэлектрической проницаемости по измерениям коэффициентов прохождения и отражения.

Выполнены измерения микроволновых коэффициентов прохождения и отражения для образцов 3D-нанокompозитных сред, в частности – магнитофотонных кристаллов, на основе опаловых матриц с внедрёнными наночастицами металлов: Co, Ag, Ni, Fe, Pd и ферритов-шпинелей, а также тонкие плёнки металло-диэлектрических нанокompозитов, содержащих Co [7]. С учётом всех возможных типов собственных мод ферромагнитной среды, была получена система уравнений, из которой можно определить численно амплитуды всех парциальных волн, существующих в металлической плёнке, а также значения коэффициентов отражения и прохождения электромагнитных волн. Анализ был выполнен с учётом обменного взаимодействия и условий закрепления спинов на поверхностях ферромагнитной среды [8]. Рассматривалось как симметричное, так и несимметричное закрепление спинов на разных сторонах плёнки. Был выполнен анализ влияния условий закрепления спинов на границах тонких металлических плёнок на параметры спин-волновых резонансов при прохождении электромагнитных волн через тонкую ферромагнитную плёнку. Показано, что значения параметров закрепления спинов на поверхностях ферромагнитной среды существенно влияют на типы резонансных явлений, существующих в тонких металлических плёнках, а также на величину и положение пика ферромагнитного резонанса. Выполнены расчёты пространственных распределений высокочастотных магнитных полей, соответствующих различным модам колебаний ферромагнитного металла.

Получены экспериментальные данные о спектре и амплитудных характеристиках линии антирезонанса в 3D-нанокompозитных материалах на основе опаловых матриц с наночастицами ферритов-шпинелей и проведён их анализ. Экспериментально измерена частотная зависимость коэффициентов отражения и прохождения электромагнитных волн через тонкоплёночные металло-диэлектрические нанокompозитные материалы и рассчитан коэффициент преломления нанокompозитов. В области миллиметровых длин волн этот коэффициент оказался существенно меньше единицы, а в отдельных случаях получено отрицательное значение коэффициента. Изученные аномальные явления позволяют считать рассматриваемые 3D-нанокompозиты метаматериалами. Основные результаты исследований обобщены в монографии [9].

Тонкоплёночные алмазоподобные покрытия

У коллектива, пришедшего из лаборатории неравновесных процессов, накоплен большой опыт приготовления углеродных алмазоподобных плёнок. Это, несомненно, важный компонент научного и технологического задела для последующего развития нынешней лаборатории углеродных наноматериалов. Развитие этого направления связано с именем И.Ш. Трахтенберга, который в полной мере обладал научной интуицией, очень нужной для выбора правильного пути развития. Творческий путь группы описан с.н.с. А.Б. Владимировым в Приложении.

Были отработаны технологии осаждения алмазоподобных плёнок толщиной от 20 нм до 2 мкм на различные подложки (Cu, Ti, W, Fe, PTE, Si и др.) с хорошей адгезией. Существующие методы осаждения: импульсно-дуговое распыление графитовой мишени (α -C плёнки) и деструкция углеводородов (α -C:H плёнки), а также их сочетание в одном вакуумном цикле. Исследованы их структура (соотношение связей sp^2/sp^3), морфология поверхности и механические свойства в зависимости от условий осаждения. Установлен механизм формирования рельефа поверхности α -C плёнок, представляющего собой доменную структуру с декорированными цепочками пиков границами (высота пиков $\sim (150-200)$ нм, плотность – 10^7 см $^{-2}$). В результате накопления внутренних напряжений первоначально плоская поверхность плёнки переходит к росту с образованием пирамид, что обеспечивает минимизацию упругой энергии плёнки. Рост пиков идёт за счёт интенсивных по-



И.Ш. Трахтенберг (сидит) с сотрудниками его исследовательской группы: (стоят слева направо) С.А. Плотников, А.П. Рубштейн, А.Б. Владимиров, В.Ю. Васильев

верхностных диффузионных перемещений атомов углерода вследствие физической природы образования алмазоподобной плёнки по механизму внутренней имплантации. Ускоренные ионы углерода ($E \sim 100$ эВ) создают в плёнке локальные области ($\sim 10^2$ атомов), в которых эффективная температура достигает (2000–3000) К, что достаточно для трансформации sp^2 в sp^3 связи между атомами углерода.

Повышение температуры поверхности плёнки при её конденсации сопровождается снижением количества sp^3 связанного углерода. Микрочастицы графитового катода, многослойные нанотрубки, образующиеся под действием дугового разряда, также вызывают локальный перегрев плёнки и её графитизацию, что инициирует диффузионный рост энергетически выгодных вытянутых выступов, высотой, сравнимой с толщиной плёнки. При этом пучки нанотрубок в своей сердцевине сохраняют трубчатую структуру, а их периферия трансформируется в направлении образования аморфных алмазоподобных плёнок. Плотность таких образований на порядок меньше плотности пиков, декорирующих границы доменов. Исследование биомедицинских свойств плёнок показало, что они повышают биосовместимость металлических имплантатов [10–13].

Исследованы азотсодержащие углеродные алмазоподобные CNx плёнки в диапазоне концентраций азота от 0 до 0,5. Установлено, что плёнки имеют композитную структуру, состоящую из α -C и C_2N доменов размером от 10 до 200 нм. Установлен механизм проводимости CNx плёнок: высокой проводимостью обладают только границы между различными структурными доменами. Увеличение концентрации азота приводит к росту количества sp^2 связей, небольшие кластеры скапливаются в агломераты, в результате чего происходит уменьшение внутренних напряжений [14].

Исследованы структура, состав и физико-механические свойства плёнок на основе карбида титана с твёрдой алмазоподобной компонентой. Многослойные плёнки с толщиной слоёв не более 50 нм были получены на установке, позволяющей осуществлять одновременное напыление титана методом дугового распыления титанового катода и углеродных плёнок методом импульсно-дугового распыления графита. Установлено, что плёнки состоят из аморфной углеродной матрицы с равномерно распределёнными в ней наноразмерными частицами (не более 20 нм) карбида титана. С ростом концентрации углерода выше 20 вес.% наблюдается уменьшение плотности и рост микротвёрдости плёнок, что отражает алмазоподобную природу аморфной компоненты композитной плёнки.

Это направление получения и исследования тонких углерод-содержащих плёнок, с одной стороны, проходит реальную проверку полезности практического применения на многих промышленных предприятиях, и является, таким образом, направлением, содержащим инновационный потенциал. С другой стороны,

коллектив, пришедший в лабораторию углеродных наноматериалов, накопил опыт технологии получения и исследования углеродных плёнок, критически важный для нынешней научной работы.

Транспортные явления в полупроводниковых наноструктурах

У научного коллектива есть хороший задел в исследовании транспортных явлений в двумерных структурах. Вместе с д.ф.м.н. В.Н. Неверовым в лабораторию углеродных наноматериалов пришла небольшая группа, специализирующаяся на измерении гальваномагнитных явлений в полупроводниковых наноструктурах. История создания группы приведена в Приложении. Разработаны и совершенствуются методики для измерения гальваномагнитных эффектов в стационарных магнитных полях до 12 Т в области температур 0,05–300 К. Исследованы эффекты локализации/делокализации носителей заряда в квантовом эффекте Холла [15]. Квантовому фазовому переходу диэлектрик-металл-диэлектрик соответствует область перехода между плато квантового эффекта Холла. Данный переход исследован в рамках теории двухпараметрического скейлинга [16,17]. При изучении эффектов туннелирования в двойной квантовой яме в параллельном плоскости гетероструктуры магнитном поле по скорости спада отрицательного магнетосопротивления удалось оценить величину электрон-электронного взаимодействия в гетероструктурах n-InGaAs/GaAs. [18].

Научные результаты и направления лаборатории акустических методов

Основой для создания коллектива лаборатории углеродных наноматериалов стала большая часть лаборатории акустических методов. Эта лаборатория работала в составе отдела неразрушающего контроля. Разумеется, цели и задачи отдела далеки от научных интересов лаборатории углеродных наноматериалов. Тем не менее, некоторые решенные лабораторией акустических методов задачи полезны для дальнейшей работы уже в нынешнем научном направлении. Кроме этого, заведующий лабораторией А.Б. Ринкевич и его исследовательская группа (к.т.н. Д.В. Перов и к.ф.м.н. Е.А. Кузнецов) продолжали (и сейчас продолжают) деятельность в области микроволновых свойств магнитных плёнок, наноструктур и нанокомпозитов.

Основные научные результаты лаборатории акустических методов:

- разработаны методы вейвлетного анализа акустических сигналов и фильтрации импульсных сигналов на фоне широкополосных помех;
- разработаны методы анализа акустических полей и сигналов применительно к целям ультразвуковой дефектоскопии;

- введён новый информативный параметр ультразвукового контроля – мгновенная частота импульсного сигнала, проведено сопоставление мгновенной частоты и формы отражателя (дефекта).

Эти результаты обобщены в нескольких монографиях, см., например, [19,20].

Приведённое выше краткое описание научных направлений, развиваемых научными работниками, вошедшими в лабораторию углеродных наноматериалов, показывает большое различие между ними. Возникает естественный вопрос, смогут ли эти направления слиться воедино, чтобы работать на основную тематику лаборатории ЛУН. Основу для позитивного ответа на этот вопрос мы ожидаем получить в течение ближайших трёх-четырёх месяцев, когда будет запущена в эксплуатацию новая установка для получения новых углеродных наноматериалов: графена, нанотрубок, фуллеренов. Это – главное. Но и помимо этого, есть ещё несколько положительных факторов.

Коллектив исполнителей имеет большой опыт в разработке физических основ получения тонкоплёночных наногетероструктур на основе перспективных материалов, включая изучение механизмов формирования состава и структуры поверхности и межслойных границ раздела, включая исследование высокочастотных, магнитных и других физических свойств под влиянием внешних воздействий и изучение особенностей спин-зависимых физических явлений в тонкоплёночных наногетероструктурах [21, 22]. Имеется опыт получения наноматериалов, экспериментальных и теоретических исследований физической природы спинтронных явлений и выявление способов управления ими, разработки ма-



Лаборатория акустических методов отмечает 8 марта 2004 г.
Слева направо: М.И. Кузнецов, В.В. Тараканов, Р.Я. Валиева, Д.В. Перов,
А.Б. Ринкевич, И.В. Колесниченко, В.А. Бархатов

кетов и опытных экземпляров устройств спинтроники различного практического назначения, создания магнитных метаматериалов и исследования их электромагнитных свойств, проведения уникальных экспериментов резонансными методами в сильных магнитном и электрическом полях [23, 24].

В отделе наноспинтроники ИФМ активно работает научная школа по спинтронике и нанотехнологиям получения металлических, металлооксидных и органических материалов и систем, руководителем которой является академик РАН В.В. Устинов. Работа лаборатории углеродных наноматериалов в составе отдела наноспинтроники, сотрудничество с лабораторией электрических явлений и её мощной технологической базой получения металлических наноструктур имеют ключевое значение для создания новых объектов спинтроники, следовательно, для дальнейшего продвижения.

Институт физики металлов УрО РАН располагают большим арсеналом оборудования как для приготовления металлических и алмазоподобных наногетероструктур, так и для микроволновых и импульсных измерений, для выполнения комплексных исследований структурного состояния объектов исследования. Коллектив участников может пользоваться нанотехнологическим оборудованием отдела наноспинтроники, а также проводить магнитные измерения и детальное исследование структурного состояния материалов в ЦКП ИФМ.

Таким образом, коллектив лаборатории углеродных наноматериалов обладает необходимыми возможностями для успешного выполнения поставленных научных задач. Исключительная перспективность тематики углеродных наноматериалов для развития квантовой наноэлектроники в России предопределяет объективную необходимость концентрации материальных и кадровых ресурсов для решения этой проблемы. В ИФМ УрО РАН уже создан значительный задел для обеспечения исследований в рассматриваемой области: сформирована технологическая база для создания наноструктур методами молекулярно-лучевой эпитаксии, магнетронного распыления и лазерной абляции, размещённая в современных чистых помещениях, имеется литографический комплекс для латерального структурирования планарных систем, приобретён комплекс современного магнитометрического оборудования, обеспечивающий все типы магнитных измерений. В распоряжении исследователей – электронный просвечивающий микроскоп прямого атомного разрешения, сканирующий атомно-силовой микроскоп, аналитическое оборудование для аттестации наноструктур. Как уже говорилось, в ближайшее время этот комплекс пополнится CVD установкой для получения углеродных наноматериалов.

Теперь можно сформулировать основные научные задачи лаборатории углеродных наноматериалов на ближайшие годы.

Углеродные наноматериалы. Задачи на будущее

Исследование уникальных физических свойств новых углеродных наноматериалов составляет одну из наиболее актуальных «горячих» тем физики твёрдого тела и нанофизики. Согласно Web of Science, к 2010 г. насчитывалось более десяти с половиной тысяч публикаций, содержащих с заглавии, введении или списке ключевых слов термин «графен». По данным Thomson Reuters, наибольшее количество статей по графену пишут исследователи из США, Китая, Японии, Германии. Россия в этом списке находится на десятом месте – с 2004 по 2011 г. российские учёные написали 363 статьи о графене.

С 2004 г. исследуются электронная структура графена и определяемые ею проводимость и подвижность носителей в графене. Несколько раньше начались интенсивные исследования транспортных и других свойств углеродных нанотрубок. Сочетание уникальных транспортных свойств углеродных наноматериалов со спин-зависящими свойствами частиц металлов предоставляет совершенно новые возможности развития спинтроники. Особенно важно, что в различных частотных диапазонах электромагнитных волн возможно существование физических явлений различной природы. Наличие магнитных свойств наночастиц, нанесённых на графен или в нанотрубки, даёт возможность создавать материалы, свойствами которых можно эффективно управлять. Это могут быть радиопоглощающие материалы, либо наоборот, материалы, прозрачные в определённом диапазоне частот. Существует возможность создания алмазоподобного покрытия с частицами переходных металлов, поглощение электромагнитных волн в котором будет значительно изменяться при достижении условий ферромагнитного резонанса в частицах. В композитных материалах металл/углерод на терагерцовых частотах возможно создание условий плазмонных возбуждений. Очень перспективной в настоящее время считается задача создания и совершенствования «графенового транзистора». В более широкой постановке – это решение проблемы управления свойствами материалов приложением электрического поля.

Большой интерес к системам с пониженной размерностью связан со значительным прогрессом технологии их изготовления. В последнее время были разработаны методы приготовления гетероструктур и сверхрешёток, содержащих полупроводниковые и углеродные компоненты, а также систем квантовыми проволоками и точками. Как электронная техника, так и фундаментальная физика требуют высокого качества двумерных электронных систем - систем с высокой подвижностью электронов. Поэтому исследование механизмов рассеяния носителей заряда является актуальной задачей.

Решение перечисленных выше проблем требует систематических исследований, проводимых квалифицированным стабильным

коллективом – лабораторией. Для успешной работы лаборатория должна быть оснащена как современным технологическим оборудованием для получения углеродных наноматериалов, так и устройствами для высокочастотных исследований. Действия лаборатории будут направлены на решение проблемы исследования терагерцовых и микроволновых свойств углеродных наноматериалов: графена, нанотрубок, алмазоподобных плёнок, содержащих частицы металлов, с целью их использования в наноэлектронике.

Исследование уникальных физических свойств новых углеродных наноматериалов составляет одну из наиболее актуальных «горячих» тем физики твёрдого тела и нанофизики. Электронная структура графена и определяемые ею проводимость и подвижность носителей в графене исследуются с момента обнаружения графена в 2004 г. Несколько раньше начались интенсивные исследования транспортных и других свойств углеродных нанотрубок. Сочетание уникальных транспортных свойств углеродных наноматериалов со спин-зависящими свойствами частиц металлов предоставляет совершенно новые возможности развития спинтроники. Особенно важно, что в различных частотных диапазонах электромагнитных волн возможно существование физических явлений различной природы. Наличие магнитных свойств наночастиц, нанесённых на графен или в нанотрубки, даёт возможность создавать материалы, свойствами которых можно эффективно управлять. Это могут быть радиопоглощающие материалы, либо наоборот, материалы, прозрачные в определённом диапазоне частот. Существует возможность создания алмазоподобного покрытия с частицами переходных металлов, поглощение электромагнитных волн в котором будет значительно изменяться при достижении условий ферромагнитного резонанса в частицах на микроволновых частотах. В композитных материалах металл/углерод на терагерцовых частотах возможно создание условий плазмонных возбуждений. Очень перспективной в настоящее время считается задача управления свойствами материалов приложением электрического поля.

Первой конкретной задачей исследования является разработка технологии получения графена и нанотрубок методом CVD. Затем будет осуществлен синтез материалов типа металл/графен. Будет разработана технология напыления алмазоподобных плёнок на проводящие (металлические) и непроводящие (кремний, полиэтилен, политетрафторэтилен) подложки и плёнок с частицами металлов.

Важной для дальнейшего исследования является задача характеристики полученных нанообъектов. Будут разработаны методы электронномикроскопического исследования структуры и анализа элементного состава. Будет проведён анализ материалов методами сканирующей АСМ и туннельной микроскопии, а также выполнен рентгенофазовый анализ.

В микроволновых и терагерцовых исследованиях ставится задача нахождения частотных областей прозрачности и областей сильного затухания волн. Будут определены частотные диапазоны, в которых показатель преломления материалов принимает отрицательный знак. Выявлены механизмы влияния внешних полей на коэффициенты отражения и прохождения и определены условия значительного изменения этих коэффициентов.

Будет проведено изучение магнитных свойств материалов типа ферромагнитный металл/графен и исследовано распространение магнитных волн в них. Будет проведено исследование электромагнитных свойств этих материалов, рассматриваемых как метаматериалы. Одну из задач составляет нахождение условий, при которых возможно описание электромагнитных свойств этих метаматериалов эффективными материальными постоянными, а также определение условий, при которых микроволновой показатель преломления метаматериала становится отрицательным, а также построение методики теоретического количественного расчёта зависимости коэффициента прохождения от напряжённости магнитного поля.

Поставленные научные задачи являются актуальными и обладают существенной новизной. Исследования углеродных наноматериалов в широкой области частот и в первую очередь в терагерцовой области до настоящего времени выполнялись фрагментарно. Систематического изучения систем металл/графен или нанотрубка/металл как объектов спинтроники до сих пор ещё не было проведено в области миллиметровых волн и более высоких частот.

Сочетание в одной лаборатории технологических возможностей получения углеродных наноматериалов вместе с металлическими частицами методом CVD-напыления, установок напыления алмазоподобных плёнок с исследовательскими измерительными установками для высокочастотных исследований обосновывают техническую возможность достижения поставленных целей.

Анализ деятельности ведущих мировых лабораторий и динамика публикаций в рассматриваемой области показывают, что выбранное в лаборатории направление исследований соответствует общемировой тенденции развития исследований транспортных, спин-зависящих и волновых квантовых явлений в углеродных наноматериалах.

А.Б. Ринкевич

Список литературы

1. V.V. Ustinov, A.B. Rinkevich et al., JMMM **177**, 18 (1998).
2. А.Б. Ринкевич, Л.Н. Ромашев, В.В. Устинов, ЖЭТФ **90**, 834 (2000).

3. V.V. Ustinov, A.B. Rinkevich et al., JMMM **198–199**, 82 (1999).
4. A.B. Rinkevich, D.V. Perov, V.O. Vaskovsky, Physica Scripta **83**, 015705 (2011).
5. V.V. Ustinov, A.B. Rinkevich, D.V. Perov et al., JMMM **324**, 78 (2012).
6. G.S. Makeeva, O.A. Golovanov, M. Pardavi-Horvath, A.B. Rinkevich, J. Appl. Phys. **113**, 173901 (2013).
7. A.B. Rinkevich, D.V. Perov et al, Metamaterials **6**, 27, (2012).
8. A.B. Rinkevich, D.V. Perov, in *Recent Research Development in Material Sciences* 2012, vol. 9, P. 157.
9. A.B. Rinkevich, D.V. Perov, O.V. Nemytova, in *Advanced Magnetic and Optical Materials*, Ashutosh Tiwari et al. (eds.), Wiley @ Scrivener Publishing LLC (2017), P. 47.
10. А.П. Рубштейн, Э.Б. Макарова, И.Ш. Трахтенберг, Ю.М. Захаров, *Биоимплантаты на основе пористого титана с алмазоподобными пленками для замещения костной ткани*, РИО УрО РАН, Екатеринбург (2012), 137 с.
11. И.Ш. Трахтенберг, А.П. Рубштейн, А.Б. Владимиров и др., ФММ **100**, 65 (2005).
12. N.V. Gavrilov, A.S. Mamaev, S.A. Plotnikov, A.P. Rubshtein et al., Surf. & Coat Techn. **204**, 4018 (2010).
13. A.P. Rubstein, E.B. Makarova, I.Sh. Trakhtenberg et al., Diamond and Related Materials **22**, 128 (2012).
14. A.P. Rubshtein, I.Sh. Trakhtenberg, A.B. Vladimirov et al., Diamond and Related Materials **14**, 1820 (2005).
15. Yu.G. Arapov, G.I. Harus, V.N. Neverov et al., Nanotechnology **13**, 86 (2002).
16. Yu.G. Arapov, S.V. Gudina, V.N. Neverov et. al., Low Temperature Physics **39**, 43 (2013).
17. Yu.G. Arapov, S.V. Gudina, A.S. Klepikova et. al., Journal of Experimental and Theoretical Physics **117**, 144 (2013).
18. Yu.G. Arapov, S.V. Gudina, A.S. Klepikova et. al., Semiconductors **47**, 1447 (2013).
19. D.V. Perov, A.B. Rinkevich, in *New Research on Acoustics*, ed. by B.N. Weiss, Nova Science Publ., N.Y. (2008), P.69.
20. Y.V. Zhitlukhina, D.V. Perov, A.B. Rinkevich, in *Handbook of interferometers*, ed. by D. Halsey and W. Raynor, Nova Science Publ., N.Y. (2009), 855p.
21. А.Б. Ринкевич, В.В. Устинов, Л.Н. Ромашев, М.А. Миляев, ЖТФ **83**, 146 (2013).
22. В.В. Устинов, А.Б. Ринкевич и др., ЖТФ **83**, 104 (2013).
23. В.В. Устинов, А.П. Носов, А.Б. Ринкевич, В.Г. Васильев, ЖЭТФ **128**, 567(2005).
24. A.B. Rinkevich et al, IEEE Trans. on Nanotechnology **13**, 3 (2014).

История одной группы

Этапы творческого пути

1979–1984 гг.

- Трахтенберг Илья Шмулевич, Владимиров Александр Борисович, Плотников Сергей Александрович, Бакунин Олег Маркович
- Группа занималась разработкой технологии напыления покрытий. Использовались два метода: 1 – ионно-плазменного распыления металлической мишени, как однородного (медь, вольфрам, хром, алюминий, титан), так и сложного состава (вольфрам-лантан, молибден-лантан и т.п.); 2 – электронно-лучевого напыления металлов.
- Работа с НПО «Светлана» г. Санкт-Петербург.
- Разработка материала катода электронных приборов.
- Результат: работа принята заказчиком (катод композит вольфрам-лантан на поверхности вольфрамового ядра, создаваемый ионно-плазменным напылением). Получено 2 патента (авторских свидетельств): № 1101060 9 (1984) «Материал для катода электронных приборов» и №1202438 (1985) «Способ изготовления катода электронного прибора».

1984–1989 гг.

- Трахтенберг Илья Шмулевич, Владимиров Александр Борисович, Плотников Сергей Александрович, Бакунин Олег Маркович, Рубштейн Анна Петровна, Кузьмина Елена Владимировна
- Разработка технологии получения алмазоподобных углеродных плёнок методом деструкции углеводородсодержащих газов (ме-

тан, пропан, ацетилен) в диодном разряде ионного источника. Исследование свойств водородсодержащих углеродных плёнок.

- Работа с НПО «Уральский Оптико-Механический Завод».
- Разработка защитных покрытий для инфракрасной оптики.
- Результат: получены положительные результаты по защите инфракрасной оптики (ZnSe, Ge, Si) помощью осаждения алмазоподобных покрытий.

1989–2007 гг.

- Трахтенберг Илья Шмулевич, Владимиров Александр Борисович, Плотников Сергей Александрович, Бакунин Олег Маркович, Рубштейн Анна Петровна, Кузьмина Елена Владимировна, Горпинченко Сергей Дмитриевич
- Разработка технологии получения алмазоподобных безводородных углеродных плёнок методом импульсного дугового распыления графита. Исследование свойств алмазоподобных плёнок как защитных и упрочняющих покрытий на режущем инструменте и парах трения, применение покрытий из аморфного углерода в медицине.
- Работа с предприятиями Уральского региона (перечислены основные предприятия):
 1. Невьянский механический завод.
 2. Свердловский инструментальный завод.
 3. Свердловский завод транспортного машиностроения.
 4. Турбомоторный завод.
 5. Уралвагонзавод.
 6. Артинский механический завод.
 7. Акционерное общество «Дата-центр».
 8. Институт травматологии и ортопедии им. Чаклина.

Сотрудники лаборатории (речь пойдёт о группе сотрудников лаборатории плёнок и покрытий, вошедших затем в лабораторию неравновесных процессов и структур, и впоследствии перешедших в ЛУН) с начала девяностых годов принимали участие в работе нескольких Международных конференций «Diamond, Diamond-like and Related Materials» с опубликованием результатов наших научных исследований в высокорейтинговом журнале «Diamond and Related Materials», что существенно повысило имидж нашей лаборатории в глазах научной общественности.

Где-то с середины девяностых годов началось интенсивное взаимодействие с иностранными партнерами. Это было вызвано как международным признанием достигнутых коллективом результатов, вследствие поездок И.Ш. Трахтенберга на несколько международных конференций, так и потеплением в международной обстановке.

В 1994 г. УрО посетила делегация Сандийской национальной лаборатории из США, находящейся в штате Нью Мехико. Илья Шмулевич предложил написать на одной страничке резюме о нашей работе и предложениях возможного дальнейшего сотрудничества. Правда, при этом он добавил, что все контракты уже розданы, но чем чёрт не шутит, может и проскочим. Я отнёс в приемную Г.А. Месяца этот листочек с нашим предложением о напылении многослойных покрытий, состоящих из титановой и углеродной плёнок. Дня через два получаю приглашение зайти в приемную Геннадия Андреевича. Встречает меня руководитель американской делегации Билл Моффат и произносит такой спич. Членам делегации понравилось наше предложение, но, к сожалению, все контракты уже распределены, но по возвращении в США он доложит дирекции Сандийской лаборатории о нашем предложении. Буквально через недели две мы получили утвердительный ответ, что с нами заключают контракт. Сумма контракта составила тридцать тысяч долларов США, что в те времена было весьма существенным подспорьем для нас. Надо сказать, что коллектив лаборатории принимал участие в трёх контрактах, финансируемых Сандийской национальной лабораторией: один – под руководством В.Б. Выходца, второй – под руководством Н.В. Гаврилова из института электрофизики, третий – под руководством И.Ш. Трахтенберга. Всего по России лаборатория Сандии распределила тридцать таких вот контрактов.

В 1995 г. я приехал на конференцию по практическому использованию алмазоподобных покрытий, которая состоялась в Гетесбурге, в Американском институте стандартов. Американские коллеги были очень удивлены тем, что я приехал один, а ведь можно было приехать и несколькими исполнителями этого контракта, все расходы оплачивала принимающая сторона.

Такие мы были простаки, что не воспользовались этой ситуацией, на халяву слетать за океан. Запомнилась встреча меня Биллом в Вашингтонском аэропорту, где я томился в ожидании его несколько часов. Совсем я уже отчаялся в смутении, как буду добираться до этого Гетесбурга, не имея тогда опыта одиночного пребывания за рубежом. И вот появляется этот длинноногий американец со словами «сорри за опоздание». У него пропал багаж, когда он летел из штата Нью-Мехико в Вашингтон. И больше всего он сожалел о том, что там были шахматы, подаренные ему самим Фишером. Я тогда подумал, что в Америке тоже воруют. Билл с большой убежденностью говорил о продолжении нашего сотрудничества в будущем. Он всё время подчеркивал, что работа, выполненная нами, оценивается очень высоко, и есть намерение дирекции продолжить в будущем это сотрудничество. Мы составили с Трахтенбергом предложение о новом взаимодействии с Сандией, на существенно большую сумму, но почему-то оно не прошло далее. Это было вызвано какими-то политическими ос-

ложнениями, которые сложились в конце 1996 г. между нашими государствами. Американцы прекратили финансирование этих проектов, а может они получили от российских учёных ту информацию о технологиях и разработках, которые осуществлялись в России при закрытом занавесе. Этого им было достаточно, чтобы прервать финансирование.

Примерно в это же время началось взаимодействие с Южно-корейской фирмой «Самсунг Электроникс». История возникновения этих отношений, которые в дальнейшем вылились в крупное достижение нашей маленькой лаборатории, что неоднократно отмечалось директором института в ежегодном отчёте, носят весьма детективный характер. При посещении делегацией Свердловской области фирмы «Самсунг» корейцы выразили желание сотрудничества с группой И.Ш. Трахтенберга из ИФМ, результаты которой по алмазоподобным плёнкам представляли для них интерес. В областной делегации был представитель уральской научной среды Л. Зверев из УрГУ, который к тому же учился с Ильёй в одной группе. Зверев сказал, что нет проблем, сейчас я ему позвоню и скажу о вашем предложении. И как говорил И.Ш., среди ночи раздался звонок из Сеула, где и было предложено это сотрудничество. Так вот, с момента первого звонка и до продажи и поставки установки в свободную территорию Китая, Тяньзинь, где находилось производство «Самсунга», прошло чуть больше года. Сотрудники нашей лаборатории Плотников, Корнеев и Давлетшин поехали в этот Тяньзинь для запуска установки и обучения работы на ней специалистов «Самсунга». В центральных российских газетах на целые развороты шла реклама «Алмазная технология Самсунг». Было очень приятно сознавать, что это – наша разработка, наши научные результаты нашли такое широкое практическое применение. Была даже публикация в областной газете «Уральский рабочий» о наших достижениях.

Где-то в году 1998 появился в нашей видимости Кенсуке Уемура. Опять же всё было на первый взгляд очень просто. Уемура был знаком с Г.А. Месяцем, тогдашним председателем УрО, называя его: Мой друг Гена. И вот как-то Кен приехал вместе с Месяцем из Томска в Екатеринбург, чтобы ознакомиться с научными разработками уральских учёных. Из всего разнообразия научных предложений Уемура выбрал нашу разработку – нанесение алмазоподобных покрытий. В течение следующего года он неоднократно посещал нас, привозил различного рода изделия, на поверхность которых мы наносили алмазоподобное покрытие. Уемура увозил всё это в Японию, где анализировали и проверяли свойства и эффективность работы изделий с покрытиями. В 1999 г. нас посетила делегация японцев в составе четырёх сотрудников фирмы «Нагато Сейки». Владелец фирмы Нагато, главный инженер Ширакура, сотрудник Икеда и сам Уемура-сан, владелец компании «Itac Ltd.», которая, собственно, и заинтересовалась нашими разработками.

Разговор шёл о заключении контракта с этой компанией на поставку в Японию двух напылительных установок. И вот в апреле 2000 г. первая команда наших сотрудников отправилась в Японию для монтажа и запуска в эксплуатацию проданных установок. Сотрудничество с компанией Кена оказалось успешным и самым продолжительным и длилось в течение полутора десятков лет. Почти все сотрудники нашей лаборатории побывали в командировках в этой сказочной стране Восходящего солнца и любовались цветущей сакурой в свободное от работы время. Надо сказать, что работали по двенадцать часов в день при одном выходном дне.

В это же время началось сотрудничество с Китаем, с Институтом физики города Ланьчжоу. В этот институт также была продана и сдана в эксплуатацию установка нанесения алмазоподобных плёнок, которая успешно продолжает работать и в настоящий момент. И как говорили сами китайцы, спустя почти пятнадцать лет, что наша лаборатория очень добросовестно выполнила этот контракт. Практически весь коллектив сотрудников нашей группы в момент сдачи установки в эксплуатацию оказался в этом городе, находящемся в провинции Ганьсу, в верховьях великой жёлтой реки Хуанхэ. Установка была запущена в эксплуатацию, было приложено много сил и изобретательности, чтобы китайская сторона

подписала акты приёмки установки. Насколько успешно было сотрудничество с этим институтом, свидетельствует тот факт, что по истечении пятнадцати лет они о нас помнят и периодически приглашают наш коллектив в новые проекты, которые, правда, никак пока не реализуются.

Одновременно с перечисленными выше проектами, в лаборатории началось сотрудничество с Израилем. По инициативе и поддержке израильских коллег была создана совместная израильско-российская компания «Диават», которая в рамках проектов, поддерживаемых Главным учёным Израиля, начала функционировать в индустриальном районе небольшого израильского городка Кирият-Гад. Предварительно, до создания этой компании, И.Ш. Трахтенберг и В.Б. Выходец посетили Израиль, доложили предложения о создании совместной компании. Предложение это было одобрено, поддержано и профинансировано израильской

стороной. Сотрудникам лаборатории предстояла задача подготовить установку для отправки в Израиль, обучить всем тонкостям работы на ней израильских коллег. Всё это было успешно проделано в 2002 г. С мая по июнь этого года пара сотрудников нашей лаборатории побывала в Израиле, работая по контракту с фирмой «Диават». Установка начала успешно работать, во время пребывания сотрудников было проведено несколько десятков напылений на различные виды промышленных изделий.

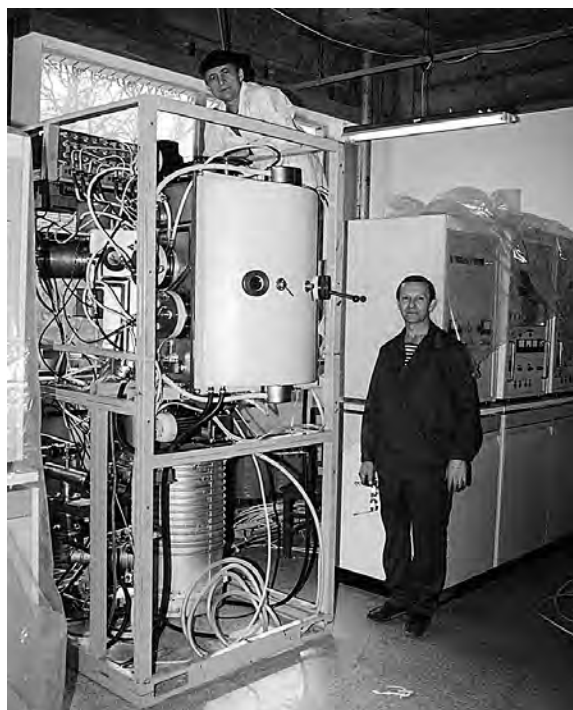
Такие вот основные моменты международного сотрудничества нашей лаборатории со середины девяностых годов прошлого уже столетия и в начале двухтысячных годов, связанные с практическим внедрением наших научных результатов и разработок. Все эти контракты осуществлялись под руководством Ильи Шмулевича Трахтенберга.

В этот период существования лаборатории были неоднократные поездки сотрудников на Международные конференции по алмазоподобным плёнкам и покрытиям. Надо сказать, что эти конференции имели место в весьма интересных и экзотических городах таких, как Ницца, Гонконг, Претория, Сидней и т.д. Эти поездки способствовали укреплению имиджа нашей лаборатории и международного признания результатов наших научных разработок.

Можно назвать этот период существования нашей лаборатории «золотым» периодом, по аналогии с «серебряным» веком в поэзии.

В настоящее время наша группа, сохранившая основной состав сотрудников, входит в состав лаборатории углеродных наноматериалов и продолжает работу в области нанесения и исследования свойств покрытий с плёнкой из аморфного алмазоподобного углерода. Как и в предыдущие года, большое внимание уделяется практическому внедрению результатов, взаимодействию с различными предприятиями.

А.Б. Владимиров



Монтаж оборудования в Институте физики г. Ланьчжоу, Китай. Наверху – А.Б. Владимиров

Группа полупроводников

Группа полупроводников перешла в ЛУН из лаборатории полупроводников и полуметаллов. Лаборатория полупроводников и полуметаллов в Институте физики металлов была создана Исааком Михайловичем Цидильковским, впоследствии академиком, в 1963 году из группы по исследованию полупроводников, созданной в начале 1961 г. В лаборатории изучались гальваномагнитные и термомагнитные явления в области классически сильных и квантовых полей в материалах Ge, InSb, InAs, HgCdTe. К 90-м годам в лаборатории сформировались три основных направления:

1) кинетические явления, в том числе квантовый эффект Холла, в двумерных структурах германий-кремний и соединений III-V; 2) аномалии кинетических явлений (термогальваномагнитных) в бесщелевых и узкощелевых полупроводниках, содержащих примеси переходных элементов; 3) кинетические и оптические явления в высокотемпературных сверхпроводниках.

В 1992 г. после окончания физического факультета УрГУ в группу по изучению двумерных свойств гетероструктур лаборатории полупроводников и полуметаллов стажёром-исследователем пришел В.Н. Неверов.

В 1993 г. Н.А. Городиловым и В.Н. Неверовым был запущен в эксплуатацию рефрижератор растворе-



Лауреаты госпремии СССР И.М. Цидильковский и Э.А. Нейфельд, 1982 г.



Группа двумерных свойств гетероструктур лаборатории полупроводников и полуметаллов, 1995 г. Слева направо: М.В. Якунин, Ю.Г. Арапов, Н.Г. Шелушинина, Г.И. Харус, аспирантка, В.Н. Неверов

ния He3-He4, который позволил получать температуры вплоть до 70 мК. Совместно с криостатом, оснащённым высокотемпературной вставкой (1,8–300 К) и вставкой He3 (0,3–4,2 К), был создан комплекс по изучению гальваномагнитных свойств проводников. С 2000 г. эти установки вошли в сектор низкотемпературной гальванометрии Центра коллективного пользования ИФМ УрО РАН (руководители: с 2000 по 2014 гг. – Э.А. Нейфельд; с 2015 по настоящее время – В.Н. Неверов).

В группе по изучению двумерных гетероструктур лаборатории полупроводников (Ю.Г. Арапов, М.В. Якунин, Г.И. Харус, Н.Г. Шелушинина, Н.А. Городилов) В.Н. Неверов включился в изучение сверхрешёток p-Ge/GeSi со сложным энергетическим спектром. На этих системах были изучены энергетический спектр валентной зоны; квантовые интерференционные поправки к проводимости двумерных систем, квантовый эффект Холла. В результате этих исследований В.Н. Неверовым в 1998 г. была защищена кандидатская, а в 2013 г. докторская диссертация. В 2003 г. В.Н. Неверову за цикл работ, посвященных изучению гетеросистем p-Ge/GeSi, была присуждена государственная премия Российской Федерации в области науки и техники для молодых учёных.

В ноябре 2013 г. В.Н. Неверов и его аспиранты А.С. Клепикова и А.С. Боголюбский вошли в состав лаборатории углеродных наноматериалов. В настоящее время группа занимается исследованием гетероструктур с большой величиной фактора Ланде n-InGaAs/GaAs, n-InGaAs/AlGaAs, HgTe/CdHgTe. На данных



В.Н. Неверов, А.С. Клепикова, А.С. Боголюбский в секторе низкотемпературной гальванометрии ЦКП ИФМ УрО РАН, 2017 г.

структурах изучаются переходы плато-плато в режиме квантового эффекта Холла. В гетеросистемах $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ исследуется энергетический спектр HgTe , где в зависимости от ширины квантовой ямы происходит переход от щелевого состояния к бесщелевому с Кейновским законом дисперсии, который наблюдается в графене. В гетероструктурах $n\text{-InGaAs}/\text{GaAs}$ был экспериментально обнаружен новый эффект - антисимметричный вклад в магнитосопротивление гетероструктур в параллельном магнитном поле.

По результатам данных исследований в 2016 г. А.С. Клепикова защитила кандидатскую диссертацию.

В.Н. Неверов

ЛАБОРАТОРИЯ электрических явлений

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Устинов Владимир Васильевич, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н., академик РАН, профессор
- Бабанов Юрий Александрович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор
- Банникова Наталья Сергеевна, научный сотрудник
- Бебенин Николай Георгиевич, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Благодатков Дмитрий Владимирович, младший научный сотрудник
- Девятериков Денис Игоревич, инженер
- Зайнуллина Римма Идиятовна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Иванов Денис Владимирович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Изюмов Михаил Юрьевич, старший лаборант
- Каменский Иван Юрьевич, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Максимова Ирина Константиновна, младший научный сотрудник
- Миляев Михаил Анатольевич, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Наумова Лариса Ивановна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Павлова Анастасия Юрьевна, научный сотрудник
- Патраков Евгений Иванович, старший научный сотрудник, к.х.н.
- Пономарев Дмитрий Андреевич, младший научный сотрудник
- Ромашев Лазарь Николаевич, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Сидун Наталия Николаевна, ведущий инженер
- Стариченко Денис Владимирович, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Тимофеева Зоя Максимовна, ведущий документовед
- Чернышова Татьяна Александровна, младший научный сотрудник

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ электрических явлений

История лаборатории электрических явлений берёт свое начало в 1932 г., когда приказом №1 по Уральскому физико-техническому институту была определена четвёрка первых структурных подразделений Института, названных тогда группами. Первой в перечне этих подразделений была «Группа 1. Магнитные и электрические явления». В сравнении с тремя другими подразделениями, эта группа выделялась тем, что для неё были назначены сразу два руководителя. Ими стали: Яков Григорьевич Дорфман и Исаак Константинович Кикоин.

Структурное деление УралФТИ на группы просуществовало два года. В 1934 г. вместо прежних групп появились отделы, лаборатории и сектора. На базе Группы 1 были образованы три отдела. Первым в списке вновь созданных отделов в приказе по УралФТИ стоял Отдел изучения электрических свойств, который возглавил И.К. Кикоин, вторым был Отдел молекулярной физики металлов и изучения физических свойств жидких металлов (руководитель Я.Г. Дорфман) и третьим – Отдел магнитных явлений (руководитель Р.И. Янус).

В 1936-м году в ходе структурных преобразований в УралФТИ все отделы были переименованы в лаборатории и Отдел изучения электрических свойств, возглавляемый Исааком Константиновичем Кикоиным, стал именоваться как Лаборатория электрических явлений. Это имя лаборатория сохранила до настоящего времени.

Таким образом, наша лаборатория ведёт своё летоисчисление с 1932-го года – года основания нашего Института, а годом её рождения с именем лаборатория электрических явлений является 1936-й год.

Вся история лаборатории электрических явлений тесно связана с именами её научных руководителей.

В первые годы работы лаборатории и вплоть до 1945 г. её заведующим был Исаак Константинович Кикоин.

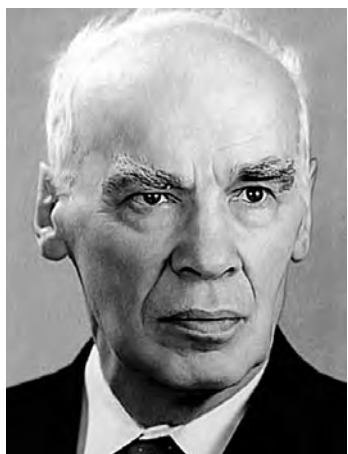
В 1945 г. И.К. Кикоина на посту заведующего лабораторией сменил Ибрагим Гафурович Факидов, который руководил лабораторией электрических явлений с 1945 по 1953 гг. и с 1957 по 1973 гг. Наличие перерыва в работе с 1953 по 1957 гг. требует отдельного пояснения. В 1953 г. лаборатория электрических явлений была исключена из структуры Института, а её заведующий И.Г. Факидов был назначен заведующим лабораторией, которая называлась «лаборатория физических основ лучевой дефектоскопии». Сведения о названии этой лаборатории в архивных документах противоречивы. Так, в ходатайстве Президиума УФАН СССР от 11 марта 1955 г. об утверждении И.Г. Факидова на должность заведующего этой лабораторией она называется как «лаборатория электрических явлений и лучевой дефектоскопии». В 1957 г. лаборатория электрических явлений была создана вновь с прежним названием, а руководителем её был назначен И.Г. Факидов.

В 1973 г. заведующим лабораторией электрических явлений был назначен Кирилл Борисович Власов, проработавший в этой должности до 1986 г.

С 1986 года по настоящее время лабораторию электрических явлений в ИФМ УрО РАН возглавляет Владимир Васильевич Устинов.

Ниже мы приведём элементы научной биографии каждого из руководителей лаборатории.

Исаак Константинович Кикоин родился 28 марта 1908 г. в небольшом провинциальном городке Жагары, на территории нынешней Литвы, в семье школьного учителя математики. Семья Кикоиных вынуждена была несколько раз менять место жительства и Исааку приходилось обучаться в разных школах. В 15 лет Исаак Кикоин заканчивает школьную учёбу в одной из лучших школ Пскова. Здесь же он поступает в Землемерное училище, а по окончании двухгодичного обучения в нём успешно сдаёт вступительные экзамены на физико-механический факультет Ленинградского политехнического института. Учась на этом факультете, Исаак Кикоин поступает на работу в ЛФТИ и продолжает работать в нём после окончания Политехнического института. Именно в ЛФТИ Кикоин успешно выполняет свои первые научные работы по исследованию гальваномагнитных явлений в жидких металлах [1]. Параллельно с изучением свойств жидких металлов он проводит исследования свойств полупроводников. И уже первые эксперименты приводят Исаака Константиновича и его дипломника Михаила Носкова к открытию нового физического явления – так называемого фотоэлектромагнитного (фотомагнитоэлектрического) эффекта [2]. Этот



И.К. Кикоин – первый заведующий лабораторией электрических явлений.

новый физический эффект был детально изучен [3,4] и получил в дальнейшем название эффекта Кикоина-Носкова.

Наряду с этими исследованиями в лаборатории электрических явлений значительное внимание уделялось явлению сверхпроводимости металлов. И. Кикоиным и Б. Лазаревым изучалась связь между эффектом Холла и сверхпроводимостью и была установлена корреляция между этими явлениями [5].

По полученным новым научным результатам И.К. Кикоин успешно защищает в 1935 г. докторскую диссертацию.

Из работ прикладного характера следует отметить две большие работы, выполненные перед началом Великой Отечественной войны И. Кикоиным, С. Губарем и В. Обуховым. Был разработан, аттестован и передан для эксплуатации новый тип приборов для измерения сильных токов (от 10 до 70 кА). Действие этих приборов основано на взаимодействии постоянного магнита с магнитным полем, создаваемым проводами, по которым протекает измеряемый ток. На этом принципе основано действие разработанных в лаборатории килоамперметров – переносных и стационарных, счётчиков киловатт-часов и ампер-часов и ваттметров. Эта работа была удостоена в 1942 г. Сталинской премии. Другая большая работа заключалась в разработке и изготовлении И. Кикоиным и Д. Симоненко масс-спектрографа для анализа газовых металлургических смесей.

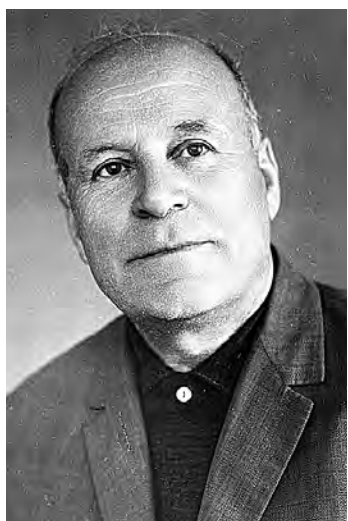
С началом Великой Отечественной войны лаборатория электрических явлений, возглавляемая И.К. Кикоиным, наряду с другими лабораториями Уральского физико-технического института, приступила к выполнению работ специального назначения. Среди них весьма ответственными являлись работы по размагничиванию кораблей для защиты их от вражеских мин [6], включающие в себя разработку и изготовление магниточувствительных пермаллоевых сплавов для магнитометров. В этих работах активное участие принимал И.Г. Факидов. Об успешном выполнении И.Г. Факидовым спецзаданий свидетельствует выписка из Приказа наркома Военно-морского флота за № 1066 от 23.12.1942 г. «За проявленную инициативу по изготовлению и освоению опытных образцов отечественных приборов – магнитометров, а также за активное участие в их изготовлении объявить инженеру И.Г. Факидову благодарность и вручить денежную премию». Проблемы по размагничиванию наших кораблей оставались актуальными в течение всей Отечественной войны, и нужно сказать, что успехи в этом деле во многом обеспечивались в Свердловске – в Институте физики металлов, где изготавливали необходимые высокочувствительные магнитометры и магнитно-мягкие железоникелевые сплавы (пермаллои) с нужными магнитными характеристиками и в необходимых количествах. По окончании войны И.Г. Факидов был награждён медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне».

В 1943 г. в Советском Союзе начались работы по развитию атомной науки и техники. И.К. Кикоин был одним из первых физиков, с которыми Игорь Васильевич Курчатов приступил к разработке всего комплекса «атомных проблем». Исаак Константинович принял активное участие в создании секретной Лаборатории № 2, позднее ставшей Институтом атомной энергии, в котором Исаак Константинович проработает до конца своей жизни (28.12.1984 г.). В 1943 г. Кикоин И.К. был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР. Действительным членом Академии наук СССР он становится в 1953 г.

Научные достижения и заслуги перед страной у Исаака Константиновича отмечались достойными наградами. Он был дважды удостоен звания Героя Социалистического Труда, ему были присуждены Ленинская и шесть Государственных премий, высшая награда Академии наук – Золотая медаль имени М.В. Ломоносова, он был награждён семью орденами Ленина. Уместно отметить, что подробное описание биографических и научных свершений в жизни Исаака Константиновича Кикоина дано в книге «И.К. Кикоин – физика и судьба», посвящённой 100-летию со дня его рождения [7].

В связи с отзывом Кикоина И.К. из Свердловска на постоянную работу в Москву в УралФТИ освободилась должность заведующего лабораторией электрических явлений. На эту должность с 1 июля 1945 г. приказом по Институту был назначен старший научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук Ибрагим Гафурович Факидов. Факидов И.Г. был хорошо знаком с научной тематикой лаборатории и имел статьи, напечатанные совместно с её сотрудниками.

В 50-х годах одна из важных задач лаборатории электрических явлений состояла в разработке и изготовлении установок, создающих сильные магнитные поля, необходимые для выполнения исследований магнитных и гальваномагнитных свойств металлов и полупроводников. Благодаря творческому энтузиазму трёх человек – заведующего лабораторией электрических явлений Ибрагима Гафуровича Факидова, научного сотрудника Эдварда Абрамовича Завадского и электромеханика Ильи Ивановича Кунцевича, проблема получения сверхсильных магнитных полей в Институте физики металлов АН СССР была успешно решена. Была разработана методика изготовления экспериментальных установок, создающих сверхсильные импульсные магнитные поля путём разряда батареи высоковольтных конденсаторов на специальный индуктор (соленоид). Такие установки (магнитоимпульсные генераторы) позволяют получить в соленоиде импульс магнитного поля напряжённостью до нескольких сотен килоэрстед [8, 9]. Работы по изготовлению таких установок, позволяющих получать импульсные поля высокой напряжённости, стали первыми



И.Г. Факидов - заведующий лабораторией с 1945 по 1973 гг.

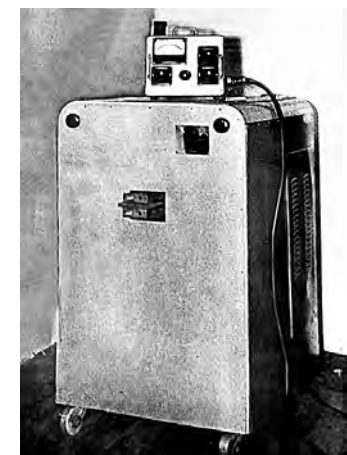
в СССР после пионерских работ Петра Леонидовича Капицы в Кембридже.

За разработку и изготовление генератора сверхсильных импульсных магнитных полей для физических исследований Институт физики металлов АН СССР был удостоен на ВДНХ Диплома Первой степени, а заведующий лабораторией И.Г. Факидов награждён Большой Золотой медалью ВДНХ.

Использование импульсных магнитных полей позволило значительно расширить исследования физических свойств металлов и полупроводников. Именно благодаря импульсным магнитным полям в ИФМ АН СССР академиком Виссарионом Дмитриевичем Садовским и его учениками было открыто и всесторонне изучено новое явление – мартенситное превращение в стали под действием сильного импульсного магнитного поля, ставшее в физическом металловедении основой нового направления, которое можно назвать «закалка стали в магнитном поле». Большой вклад в развитие этого направления внесён лабораторией электрических явлений. Некоторые элементы этого вклада отмечены в обзорной статье [10], а здесь представлены фотографией пластины из аустенитной стали, на поверхности которой импульсным магнитным полем образованы («написаны») мартенситные буквы, свидетельствующие о возможности локального упрочнения импульсным магнитным полем изделий из аустенитных сталей.

С изготовлением генераторов сильных импульсных магнитных полей в лаборатории электрических явлений появились новые возможности решения не только научных, но и технических задач. Нужно сказать, что И.Г. Факидов всегда уделял большое внимание связи науки с производством. Поэтому ему довольно быстро удалось найти перспективные технические применения импульсным магнитным полям. Особенно актуальны были работы по магнитно-импульсному съёму (отделению) с листовых катодов электролитически осаждённых металлов (цинка, никеля, меди и др.). Многие технические решения, предложенные И.Г. Факидовым, защищены авторскими свидетельствами и патентами, а сам он был удостоен знака «Изобретатель СССР».

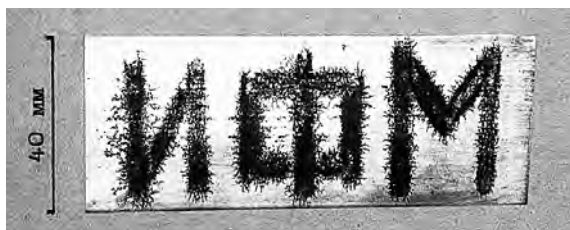
Под руководством Ибрагима Гафуровича в лаборатории электрических явлений ИФМ подготовили и защитили кандидатские диссертации не менее десятка человек – аспирантов и соискателей, среди которых: А.Е. Бузынов, А.А. Самохвалов, Н.И. Давиденко, Э.А. Завадский, Б.В. Знаменский, В.Н. Новогрудский, Ю.Т. Коврижных, Л.Д. Ворончихин, А.М. Бурханов, Л.Н. Ромашев.



Генератор сильных импульсных магнитных полей.



Диплом Первой степени ВДНХ.



Мартенситные буквы, «написанные» на пластине из аустенитной стали импульсным магнитным полем.

Начав свой научный творческий путь в лаборатории электрических явлений, стали докторами наук и известными учёными: Алексей Андреевич Самохвалов, создавший и возглавивший в ИФМ лабораторию магнитных полупроводников, и Эдвальд Абрамович Завадский, ставший директором Донецкого физико-технического института, хорошо известного своими научными достижениями.

В связи с выходом И. Г. Факидова на пенсию в 1973 г. научным руководителем лаборатории электрических явлений был назначен доктор физ.-мат. наук Кирилл Борисович Власов.

К.Б. Власов родился в г. Новочеркасске Ростовской области 4 апреля 1920 г. В 1938 г. по окончании (с аттестатом отличника) средней школы в г. Горьком поступил в Уральский индустриальный институт им. С.М. Кирова. Кириллу Борисовичу очень повезло: физику на факультете преподавал Исаак Константинович Кикоин. Это отразилось на всей его последующей жизни. В 1942 г. он окончил энергетический факультет и получил диплом с отличием. Окончив институт, Кирилл Борисович некоторое время работал инженером на оборонном заводе, а в октябре 1945 г. поступил в аспирантуру Института физики металлов Уральского филиала академии наук СССР по специальности «Физика металлов».

В ноябре 1949 г. Кирилл Борисович защитил кандидатскую диссертацию по теме: «Температурная зависимость анизотропной коэрцитивной силы в монокристаллах трансформаторной стали». Защита состоялась в Уральском государственном университете им. А.М. Горького. Официальным оппонентом по диссертации был доктор физ.-мат. наук профессор С.В. Вонсовский. В 1965 г. К.Б. Власов защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора физико-математических наук на тему: «Некоторые вопросы теории динамических и квазистатических свойств магнетостатических сред».

Став заведующим лабораторией электрических явлений, Кирилл Борисович не только продолжил начатые ранее в лаборатории исследования магнитных свойств магнетиков, но и создал своё новое направление – экспериментальное изучение поляризационных магнитоакустических явлений в металлах в широком диапазоне температур и магнитных полей.

Научная деятельность К.Б. Власова на посту заведующего лабораторией электрических явлений была многогранной и охватывающей целый ряд разделов физики твёрдого тела. Широкую известность получили его работы, внёсшие основополагающий вклад в создание физических основ высокочастотной магнитоакустики [11]. Фундаментальные результаты получены им с коллекти-

вом учеников в исследованиях физических свойств магнитоупорядоченных веществ. К.Б. Власовым предсказан ряд новых поляризационных магнитоакустических явлений [12]. Некоторые из этих эффектов обнаружены и экспериментально исследованы совместно с В.В. Гудковым, А.Б. Ринкевичем и А.М. Бурхановым. За развитие теории магнитоупругих сред К.Б. Власов был награжден орденом «Знак Почёта» и включён вместе с Евгением Акимовичем Туровым в коллектив авторов, получивших Государственную премию УССР за работу «Открытие и исследование динамических явлений, связанных с фоновыми взаимодействиями в магнитных кристаллах».

Благодаря своим высоким человеческим качествам и преданному служению науке Кирилл Борисович имел высокий авторитет у своих коллег. В 1984 г. ему было присвоено учёное звание профессора. Много времени К.Б. Власов отдал своим ученикам. Большинство из них стали хорошими специалистами. Под его руководством подготовлено и защищено 14 кандидатских диссертаций. Четверо его учеников (Б.Н. Филиппов, А.Б. Ринкевич, В.В. Гудков и Я.Г. Смородинский) стали докторами наук.

В 1986 г. Кирилл Борисович вышел на пенсию по возрасту. Однако вплоть до 1998 г. он продуктивно работал в лаборатории в должности ведущего научного сотрудника [13].

С 1986 года по настоящее время лабораторию электрических явлений в ИФМ УрО РАН возглавляет Владимир Васильевич Устинов.



К.Б. Власов – заведующий лабораторией электрических явлений с 1973 по 1986 гг.



Коллектив лаборатории электрических явлений, руководимой профессором К.Б. Власовым. Сидят: Р.И. Зайнуллина, И.И. Кунцевич, В.Н. Новогрудский, К.Б. Власов, В.И. Тимошук, Т. Сохарева. Стоят: А.Б. Ринкевич, В.Н. Сесекин, А.М. Бурханов, Л.Н. Ромашев, А.А. Тетерин, Я.Г. Смородинский, Е.А. Розенберг.



В.В. Устинов – заведующий лабораторией электрических явлений с 1986 г. по настоящее время

В.В. Устинов родился в 1949 г. в городе Нижнем Тагиле. Школу окончил с серебряной медалью и поступил на физический факультет Уральского государственного университета им. А.М. Горького. Первым научным руководителем Владимира Устинова был Павел Степанович Зырянов – талантливый учёный и светлой души человек. Уже на втором курсе студент В.В. Устинов получил от Павла Степановича предложение начать заниматься научной работой в лаборатории кинетических явлений. По окончании университета с отличием в 1971 г., Владимир Устинов получил направление для поступления в аспирантуру Института физики металлов УрО РАН. Конкуренция была очень жёсткая – 5 человек на место и все с «красными» дипломами. Директор института Михаил Николаевич Михеев оказался перед трудным выбором, в результате которого все поступающие в аспирантуру были приняты. Владимир Устинов поступил в очную аспирантуру к П.С. Зырянову, однако в силу сложившихся обстоятельств (Павел Степанович трагически погиб) научным руководителем В.В. Устинова был назначен ученик Павла Степановича – Всеволод Игоревич Окулов.

В лаборатории кинетических явлений В.В. Устинов изучал влияние поверхностного рассеяния электронов проводимости на электромагнитные свойства металлов [14–17], решению этих проблем была посвящена его кандидатская диссертация, успешно защищённая в 1975 г. В конце семидесятых годов В.В. Устиновым были начаты исследования спин-зависящих кинетических явлений в металлах и тонких металлических плёнках [18]. Эти работы положили в ИФМ начало исследованиям в области физики твёрдого тела, которая сегодня называется «наноспинтроники». Частичные итоги его первых работ по спинтронике подведены в обзоре [19]. В 1986 г. Владимир Васильевич защитил докторскую диссертацию по теме: «Поверхностные эффекты в кинетике и спиновой динамике электронов проводимости в металлах».

После защиты докторской диссертации в 1986 г. В.В. Устинов возглавил лабораторию электрических явлений и стал заместителем директора института по научным вопросам. В 1992 г. он получил учёное звание профессора, а в 1997 г. был избран членом-корреспондентом РАН. В 1998 г. он был избран на должность директора ИФМ УрО РАН. С 2008 г. Владимир Васильевич является действительным членом РАН по Отделению нанотехнологий и информационных технологий.

Начав свою научную работу физиком-теоретиком в лаборатории кинетических явлений, В.В. Устинов прошёл хорошую школу совместных работ с физиками-экспериментаторами. Ко времени начала работы в должности заведующего электрических явлений им был уже сформирован существенный задел по исследованиям

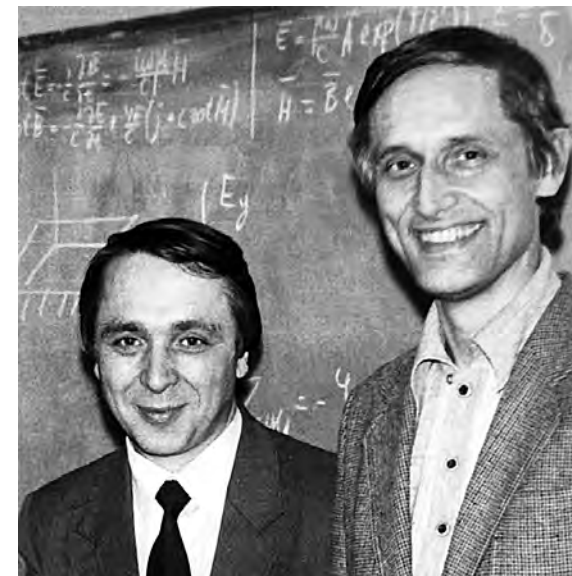
спин-зависящих релаксационных явлений в металлических плёнках магнитными резонансными методами, а также по изучению размерных эффектов в транспортных свойствах металлов.

По инициативе В.В. Устинова многообещающее в научном и практическом плане направление исследований – спинтроника металлических наноструктур – стало активно развиваться в Институте физики металлов УрО РАН.

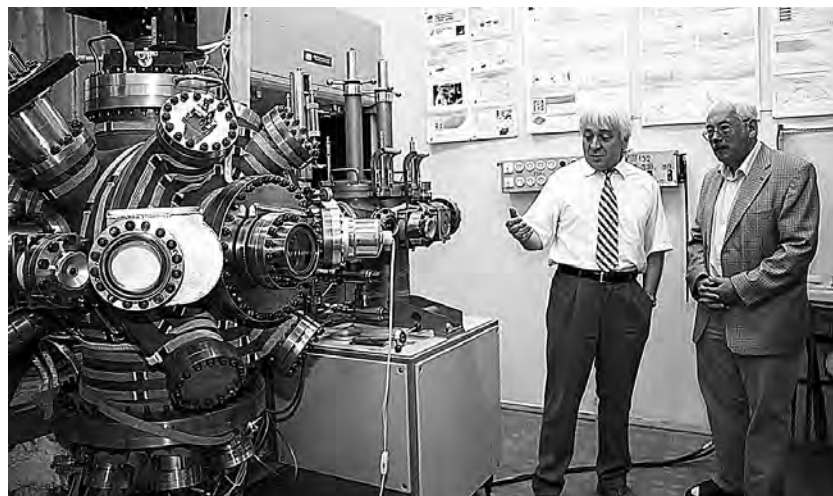
Для изготовления уникальных наноматериалов – металлических магнитных сверхрешёток, спиновых клапанов, в лаборатории электрических явлений были приобретены отечественная сверхвысоковакуумная установка молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-С» и высоковакуумная магнетронная установка MPS-4000-С6 (фирма ULVAC Inc., Япония).

В.В. Устиновым были организованы комплексные теоретические и экспериментальные исследования получаемых в лаборатории многослойных наноструктур, направленные на выяснение природы и механизмов формирования гигантских аномалий их магнитотранспортных свойств.

Для обеспечения самого высокого уровня совершенства получаемых в лаборатории металлических магнитных наноматериалов, микрообъектов из многослойных наноструктур и исследования их физических свойств ИФМ УрО РАН был построен комплекс «чистых помещений» общей площадью 243 м² с классами чистоты ИСО-7 и ИСО-9. У иностранных производителей был закуплен комплекс литографического оборудования. В литографическую линейку входят: электронный литографический модуль фирмы Raith на базе растрового микроскопа FEI Inspect F; комплект оборудования для фотолитографии: установка сухого плазменного травления Oxford Plasma Pro NGP 80, установка получения сверхчистой воды Millipore, центрифуга Sawatec SM 180, термостол Sawatec HP 150, проявочная машина Sawatec LRD 250, установка совмещения и экспонирования Suss MJB 4, систем контроля качества фотолитографии Olympus BX-51-P; комплект оборудования для напыления микроконтактов: установка вакуумного напыления Kurt J Lesker PVD 75, установка напыления контактных площадок Q150T-ES, установка формирования микроконтактов HB16TPT, микрораздаточная станция Cascade PM5. Сверхвысоковакуумная установка молекулярно-лучевой эпитаксии и всё выше перечисленное литографическое оборудование.



В.В. Устинов, В.И. Окулов



Академик В.В. Устинов и Нобелевский лауреат по физике П. Грюнберг в лаборатории электрических явлений ИФМ УрО РАН около установки молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-С» (2007 г.).

В ходе проводимых исследований обнаружены новые эффекты, связанные с существованием специфического магнитного упорядочения и сильной спиновой зависимости процессов рассеяния носителей заряда [20], построена квазиклассическая теория эффекта гигантского магнитосопротивления [21].

Большой интерес для физики магнитных явлений и технических приложений представляют выращенные в лаборатории электрических явлений сверхрешётки с управляемым неколлинеарным магнитным упорядочением металлических слоёв [22] и кластерно-слоистые наноструктуры с немонотонной температурной зависимостью электросопротивления, подобной эффекту Кондо [23], сверхрешётки с гигантским ступенчатым магнитосопротивлением [24].

Экспериментально обнаружен и детально исследован высокочастотный аналог эффекта гигантского магнитосопротивления [25]. Выполнены оригинальные магнитооптические исследования спин-зависящего рассеяния электронов проводимости в условиях гигантского магниторефрактивного эффекта в магнитных сверхрешётках [26].

Всесторонне исследован новый класс материалов с колоссальным магнитосопротивлением [27], результаты этого цикла работ подытожены в обзоре [28].

Разработаны новые методики аттестации атомной и магнитной структуры слоёв и интерфейсов в металлических наноструктурах с использованием рентгеновских лучей и синхротронного излучения [29]. Реализовано комплементарное применение нейтронного и рентгеновского синхротронного рассеяния для определения магнитной микроструктуры обменно-связанных слоистых наногетероструктур [30].

Получены гетероструктуры ферромагнетик/полупроводник, в которых реализован эффект генерации электромагнитного излучения в условиях спиновой инжекции. Разработан и запатентован перестраиваемый по частоте спиновый инжекционный лазер терагерцового диапазона [31]. Синтезированы безгистерезисные высокочувствительные спиновые клапаны с уникальными функциональными характеристиками, не уступающими лучшим зарубежным аналогам, представляющие интерес для практических приложений [32].

Результаты работы руководителя и сотрудников лаборатории высоко оценены государством и научным сообществом.

Академик Устинов удостоен Государственных наград: Ордена Дружбы (2002 г.) и Ордена Почёта (2010 г.).

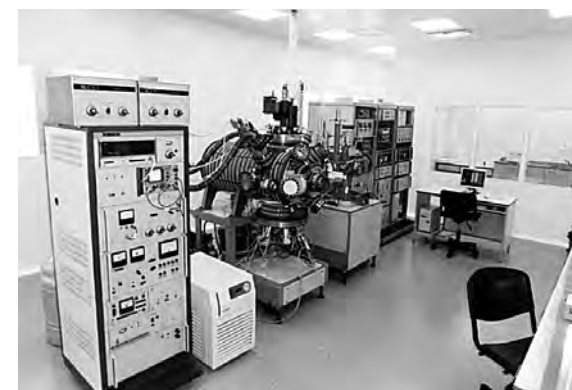
Научная школа академика В.В. Устинова «Магнетизм и спинтроника металлических наноструктур» получила официальное признание в рамках Президентской программы поддержки научных школ.

Академик В.В. Устинов награждён золотой медалью имени С.В. Вонсовского (2010 г.) за большой вклад в развитие фундаментальных и прикладных исследований в области физики магнитных явлений и организацию академической науки на Урале и медалью имени М.Н. Михеева (2016 г.) за создание в Институте физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН ведущей научной школы и высокотехнологического комплекса для исследований по магнетизму и спинтронике металлических наноструктур.

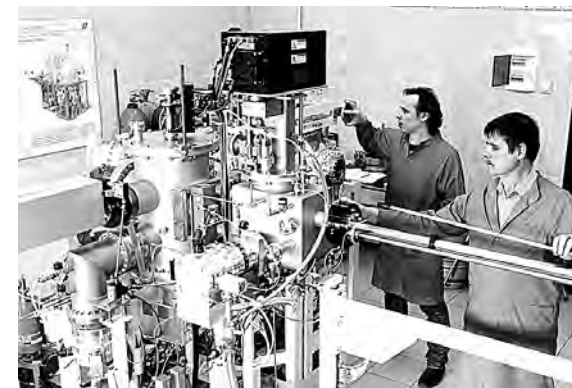
В.В. Устинов является лауреатом премии имени А.Ф. Иоффе (2011 г.) за цикл работ «Спиновые явления в полупроводниковых, металличе-



Исследования на сверхвысоковакуумном сканирующем туннельном микроскопе VT STM (Omicron Nanotechnology) ведёт Л.Н. Ромашев.



Установка молекулярно-лучевой эпитаксии в чистых помещениях лаборатории электрических явлений.



За работой на магнетронной установке MPS-4000-C6 М.А. Миляев (справа) и В.В. Проглядо.



Литографический комплекс в чистых помещениях лаборатории электрических явлений ИФМ УрО РАН.



Коллектив лаборатории электрических явлений в 2012 г.

ских и магнитных наноструктурах» и премии имени В.Н. Татищева и Г.В. де Генина (2011 г.) в области науки, техники и медицины «За разработку наноструктурированных магниточувствительных материалов и устройств промышленной автоматики на их основе». Последняя из выше упомянутых премий получена им в составе авторского коллектива, в который входят сотрудники лаборатории электрических явлений М.А. Миляев и Л.Н. Ромашев.

Процитированные выше научные статьи – это только очень малая часть работ, выполненных сотрудниками лаборатории электрических явлений за последние годы. Они приведены здесь как примеры результатов нашей научной работы, а также для того, чтобы читатель мог видеть фамилии всех сотрудников лаборатории, внёсших свой вклад в развитие конкретных научных направлений лаборатории.

В настоящее время в лаборатории электрических явлений трудится 21 человек, в числе которых 1 академик РАН, 2 доктора физ.-мат. наук, 10 кандидатов наук (из них 8 кандидатов физ.-мат. наук, 1 кандидат химических наук и 1 кандидат технических наук).

Сочетание высокого кадрового потенциала и прекрасной материально-технической базы, созданных в лаборатории, открывает перед лабораторией электрических явлений широкие горизонты в мире современной науки.

В.В. Устинов, Л.Н. Ромашев

Список литературы

1. И.К. Кикоин, И.Г. Факидов, ЖЭТФ **3**, 36 (1933).
2. И.К. Кикоин, М.М. Носков, ЖЭТФ **4**, 123 (1934).
3. И.К. Кикоин, ЖЭТФ **8**, 826 (1938).
4. Д.Л. Симоненко, ЖЭТФ **8**, 836 (1938).
5. И. Кикоин, Б. Лазарев, ЖЭТФ **3**, 44 (1933).
6. Б.А. Ткаченко. *История размагничивания кораблей Советского Военно-Морского Флота*, Наука, Ленинград (1981), 224с.
7. И.К. Кикоин – *Физика и судьба*, Отв. ред. С.С. Якимов, Наука, Москва (2008), 933с.
8. И.Г. Факидов, Э.А. Завадский, ФММ **6**, 569 (1958).
9. И.Г. Факидов, Э.А. Завадский, ФММ **8**, 562 (1959).
10. В.М. Счастливцев, Л.Н. Ромашев, В.Д. Садовский, ФММ **67**, 629 (1989).
11. К.Б. Власов, А.Б. Ринкевич, Н.А. Зимбовская, ФММ **52**, 517 (1981).
12. А.М. Бурханов, К.Б. Власов, В.В. Гудков, И.В. Жевстовских, Акустич. журнал **34**, 991 (1988).
13. К.В. Vlasov, R.I. Zainullina, V.V., JMMM **161**, 189 (1996).
14. В.И. Окулов, В.В. Устинов, ЖЭТФ **67**, 1176 (1974).
15. В.В. Устинов, В.И. Окулов, ФММ **37**, 263 (1974).
16. В.В. Устинов, В.И. Окулов, ФММ **37**, 39 (1974).
17. В.И. Окулов, В.В. Устинов, ФНТ **5**, 213 (1979).
18. В.И. Окулов, В.В. Устинов, ФММ **44**, 43 (1977).
19. V.V. Ustinov, Sov. Sci. Rev. Sect. A, Phys. Rev. **7**, 227 (1986).
20. В.В. Устинов. ЖЭТФ **106**, 207 (1994).
21. V.V. Ustinov, E.A. Kravtsov, JMMM **148**, 307 (1995).
22. V.V. Ustinov, N.G. Bebenin, L.N. Romashev, V.I. Minin, M.A. Milyaev, A.R. Del, A.V. Semerikov, Phys. Rev. B **54**, 15958 (1996).
23. V.V. Ustinov, L.N. Romashev, M.A. Milayev, A.V. Korolev, T.P. Krinitsina, A.M. Burkhanov. JMMM **300**, 148 (2006).
24. V.V. Ustinov, M.A. Milayev, L.N. Romashev, T.P. Krinitsina, A.M. Burkhanov, V.V. Lauter-Pasyuk, H.J. Lauter, JMMM **300**, e281 (2006).
25. В.В. Устинов, А.Б. Ринкевич, Л.Н. Ромашев, Д.В. Перов, ЖТФ **74**, 94 (2004).
26. I.D. Lobov, M.M. Kirillova, A.A. Makhnev, L.N. Romashev, V.V. Ustinov, Phys. Rev. B **81**, 134436 (2010).
27. N.G. Bebenin, R.I. Zainullina, N.S. Chusheva, V.V. Ustinov, Y.M. Mukovskii, J. Phys.: Condens. Matter **17**, 5433 (2005).
28. Н.Г. Бебенин, Р.И. Зайнуллина, В.В. Устинов, УФН (2017), принято к публикации.
29. Yu. Babanov, Yu. Salamatov, V. Vasin V. Ustinov, Superlattices and Microstructures **82**, 612 (2015).
30. Е.А. Кравцов, В.В. Устинов, ФТТ **52**, 2116 (2010).
31. Н.А. Виглин, В.В. Устинов, В.В. Осипов, Письма ЖЭТФ **86**, 221 (2007).
32. М.А. Milayev, L.I. Naumova, T.A. Chernyshova, V.V. Proglyado, N.A. Kulesh, E.I. Patrakov, I.Y. Kamenskii, V.V. Ustinov, Phys. Met. Metallogr. **117**, 1179 (2016).

ОТДЕЛ

неразрушающего

контроля

ЛАБОРАТОРИЯ

дефектоскопии

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Шлеенков Александр Сергеевич, заведующий лабораторией, д.т.н.
- Бенклевская Нина Павловна, главный специалист
- Булычев Олег Анатольевич, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Ефремов Тимур Алмозович, старший инженер
- Краснов Александр Семенович, старший инженер
- Куковенко Александр Владимирович, регулировщик радиотехнических и электро-механических приборов и систем 6 разряд
- Лядова Наталия Михайловна, ведущий технолог
- Мезенцева Ольга Владимировна, технолог
- Новгородов Данил Викторович, научный сотрудник
- Пастухов Андрей Борисович, ведущий конструктор
- Пашагин Александр Иванович, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Печенков Александр Николаевич, старший научный сотрудник, д.т.н.
- Рыбалко Валерий Георгиевич, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Сандовский Владимир Аронович, ведущий научный сотрудник, д.т.н.
- Сосновский Вячеслав Амирович, регулировщик радиоаппаратуры 6 разряд
- Сурков Андрей Юрьевич, младший научный сотрудник
- Таскаева Ольга Дмитриевна, монтажник радиоэлектр. аппаратуры 6 разряд
- Худорожков Сергей Владимирович, ведущий инженер
- Щербинин Виталий Евгеньевич, главный научный сотрудник, д.т.н., чл.-корр. РАН, профессор
- Щуклина Вера Николаевна, старший лаборант

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ дефектоскопии

Историческая справка

Лаборатория дефектоскопии входит в состав отдела неразрушающего контроля. Она организована 30 марта 1970 г. путём деления лаборатории электромагнетизма, основанной в 1932 г. известным учёным, профессором Рудольфом Ивановичем Янусом. Первым заведующим новой лабораторией был д.т.н. Зацепин Николай Николаевич. С 1971 по 2003 г. лабораторией руководил член-корреспондент РАН, профессор Виталий Евгеньевич Щербинин, с именем которого связаны наиболее существенные достижения лаборатории.

Научные направления:

- Исследования в области магнитной, вихретоковой и пирозлектромагнитной дефектоскопии, дефектометрии ферромагнитных изделий и сварных соединений в постоянных, переменных и импульсных магнитных полях.
- Компьютерное моделирование магнитных полей дефектов. Решение прямых и обратных задач магнитной и вихретоковой дефектоскопии и структуроскопии.
- Разработка и синтез матричных преобразователей высокого разрешения, а также интеллектуальных сенсоров магнитного поля на основе применения современных нанотехнологий.
- Разработка физических основ построения систем магнитной микроскопии, томографии и диагностики.
- Исследование влияния внешних факторов на надёжность и долговечность эксплуатации газотранспортного оборудования.



В.Е. Щербинин



Н.М. Родигин

- Разработка методов оценки технического состояния газотранспортного оборудования и прогнозирования остаточного ресурса его работоспособности.
- Создание новой дефектоскопической аппаратуры для автоматизированного неразрушающего контроля (НК) стальных труб и сварных соединений, отвечающей требованиям современного производства (научное приборостроение).

Следует отметить также научный вклад д.т.н. Николая Михайловича Родигина, д.т.н. Вениамина Васильевича Власова, д.т.н., профессора Юрия Петровича Суркова, д.т.н. Владимира Ароновича Сандовского и многих других сотрудников старшего поколения, плодотворная работа которых определила наиболее важные направления научных исследований лаборатории.

Н.М. Родигин создал дефектоскоп ДВТ-1 модуляционного типа для контроля деталей на наличие дефектов при их вращении, а также установку для импульсного намагничивания. У него была монография «Индукционный нагрев» (издана в 1950 г.), в которой излагались начала электродинамики.

В.В. Власов занимался контролем железнодорожных рельсов и создал магнито-вихретоковый вагон-дефектоскоп для контроля дефектов на их поверхности при движении вагона.

В.А. Сандовский возглавил группу вихревых токов после ухода Н.М. Родигина. Им, совместно с д.ф.м.н. В.В. Дякиным, выполнены фундаментальные теоретические исследования по решению ряда прямых и обратных задач вихретокового контроля. Группой В.А. Сандовского проводятся также экспериментальные исследования в области электродинамики применительно к контролю магнитных сталей и создано большое количество вихретоковых приборов, которые нашли широкое промышленное применение.

Ю.П. Сурков и В.Г. Рыбалко с сотрудниками занимались диагностикой газопроводов. Ими разработана и успешно внедрена на практике методика прогнозирования остаточного ресурса на основе данных магнитной дефектоскопии. Изучено поведение стресс-коррозионных трещин, обнаруженных в действующих магистральных газопроводах при статическом и циклическом нагружении труб внутренним давлением с одновременным измерением глубины трещин методами дефектоскопии. Полученные данные были использованы при оценке степени опасности обнаруженных трещин КРН в зависимости от их размеров и уровня рабочего давления.

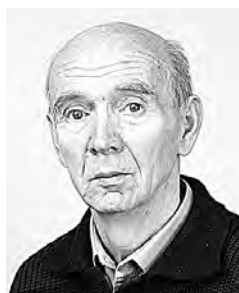
А.Н. Печенков разработал математические и алгоритмические основы использования в компьютерном моделировании электрических и магнитных полей таких объемных тел, как прямоугольные (или почти прямоугольные) параллелепипеды и призмы с однородной намагниченностью, однородной электрической поляризацией, однородной объемной плотностью тока. Им раз-



В.В. Власов



В.А. Сандовский



Ю.П. Сурков

работаны физические основы создания и использования почти идеально однородно намагниченных тел различных (но не произвольных) геометрических форм в неоднородных внешних полях, а также рассмотрена постановка и подходы к решению некоторых обратных магнитостатических задач. Предложен адаптивный алгоритм для расчёта длинных траекторий невзаимодействующих зарядов, движущихся одновременно в магнитном и электрическом полях.

А.И. Пашагин работает в лаборатории дефектоскопии со дня её основания. Им совместно с Н.П. Бенклевской проведены экспериментальные исследования магнитостатических полей дефектов применительно к контролю ферромагнитных изделий. Впервые исследовано поле дефекта конечной протяжённости, показано влияние длины дефекта на его поле. Учтено влияние нижней границы изделия на поле дефекта. Установлено, что при приближении к ней дефекта поле внутреннего дефекта, измеряемого на наружной поверхности, может возрасти несмотря на его удаление от точки наблюдения. На основе исследований разработан ряд дефектоскопов типа МДСШ – для контроля сварных швов электросварных труб методом магнитного поля рассеяния, а также дефектоскоп МД-25 для контроля поверхностных дефектов горячекатаных и обсадных труб с помощью метода высокочастотного магнитного потока рассеяния.

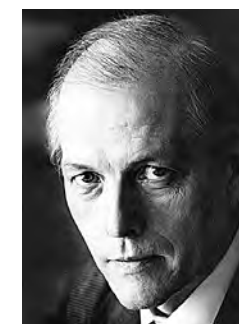
О.А. Булычев разработал и испытал с последующим внедрением в промышленных условиях устройство намагничивания спиральношовной трубы с помощью наклонного соленоида на основе магнитного дефектоскопа МД-32. Разработал феррозондовый магнитометр ИФМ/Ф-2М. Провёл исследования и разработал магниточувствительные датчики на основе анизотропии магнетосопротивления в металлических ферромагнитных плёнках с последующим применением в матричных преобразователях магнитного поля, которые используются в качестве магниточувствительных элементов установок неразрушающего контроля электросварных труб УМД-101М и насосно-компрессорных труб УМД-104.

Л.С. Правдин долгое время возглавлял группу магнитоупругих методов НК. Эта группа выполняла исследования электрических, магнитных, акустических и магнитоупругоакустических свойств изделий порошковой металлургии с целью создания методов и средств НК и их механических свойств. Ими осуществлены разработка и внедрение магнитоакустического метода НК качества высокопрочного чугуна и приборов контроля изделий ответственного назначения из ВПЧ.

М.Л. Шур известен своими теоретическими работами в области расчётов магнитостатических полей поверхностных и цилиндрических дефектов, расположенных в плоскопараллельной ферромагнитной пластине или в стенке трубы. Им получен ряд



В.Г. Рыбалко



А.Н. Печенков



А.И. Пашагин



О.А. Булычев



Н.П. Бенклевская

аналитических зависимостей, обеспечивающих хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных. Под его руководством выполнена важная работа по внедрению магнитографического дефектоскопа для контроля сварных швов морских газопроводов в подводных условиях.

Г.И. Деордиев и Н.И. Шакшин, занимались исследованиями в области резонансного ЭМА-метода с целью устранения влияния демпфирующего фактора и вариаций размеров дефекта на результаты НК. Ими выполнена разработка и внедрение многопараметровых методов и средств НК изделий порошковой металлургии, исследована возможность применения в НК высокоэффективных методов обработки измерительной информации.

В 2003 г. лабораторию возглавил д.т.н. Александр Сергеевич Шлеенков, который внёс существенный вклад в разработку и синтез на основе современных нанотехнологий однокристалльных матричных преобразователей высокого разрешения для систем магнитной микроскопии, томографии и диагностики ферромагнитных изделий и сварных соединений. Под его руководством разработано и внедрено в различных отраслях промышленности более 30 установок для автоматизированного НК электросварных и горячекатаных нефтегазопроводных труб по всему периметру и всей толщине стенки.

С учётом последних достижений фундаментальная проблема, которую решает лаборатория в настоящее время, – получение информации о различных свойствах материалов, изделий и сварных соединений посредством воздействия на них электромагнитным полем с целью совершенствования (модернизации) существующей дефектоскопической аппаратуры и разработки физических основ создания новых методов и средств НК и диагностики (в том числе внутритрубной) трубопроводов и других объектов ответственного назначения, позволяющих считывать информацию об имеющихся несовершенствах изделия на значительном расстоянии от его поверхности.

Наиболее значительные результаты, полученные в лаборатории

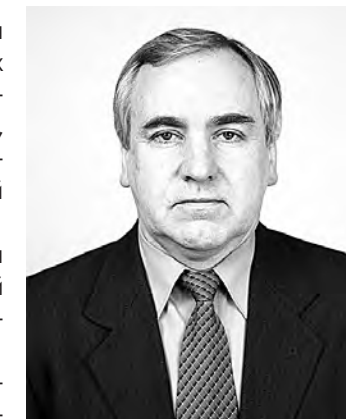
- Модель Зацепина-Щербинина. В основе модели лежит гипотеза о равномерном распределении поверхностных магнитных зарядов на перпендикулярных к намагничивающему полю гранях дефекта. Сам дефект моделируется прямоугольной канавкой шириной $2b$ и глубиной h . Составляющие магнитного поля дефекта, эквивалентного ленточного диполя, вычисляются простым выражением, которое качественно неплохо описывает магнитные поля реальных поверхностных дефектов.
- Решён ряд актуальных задач магнитной дефектоскопии и толщинометрии, выполнены основополагающие теоре-



Н.И. Шакшин

тические и экспериментальные исследования по установлению связи вторичных магнитных полей рассеяния с геометрическими параметрами дефектов типа нарушений сплошности, по обоснованию рациональных функциональных схем автоматических приборов магнитной толщинометрии.

- Впервые сформулированы базовые положения о преобразовании полей дефектов магнитной лентой при магнитографической дефектоскопии изделий.
- Выполнена работа по компьютерному моделированию обратной задачи (ОЗ) магнитостатической дефектоскопии. Построен численный алгоритм решения системы интегральных уравнений Фредгольма 1-го и 2-го рода, позволяющий определять произвольное распределение намагниченности и дефектов в расчётной области по результатам измерений внешнего магнитного поля объекта контроля.
- Разработана методика восстановления магнитного поля дефекта, позволяющая существенно повысить точность и информативность методов магнитной дефектоскопии, оптимизировать расположение МЭ и одновременно даёт возможность получить новые косвенные информативные признаки, содержащие сведения о параметрах источника магнитных возмущений.



А.С. Шлеенков



Лаборатория дефектоскопии образца 1982 г. Слева направо 1-й ряд: Н.П. Бенклевская, В.А. Бурцева, Р.И. Лукьянова, И.А. Телегина, Б.М. Степанов, Г.В. Воронин, М.Л. Шур; 2-й ряд: В.Г. Кулеев, Ю.В. Стёпин, Б.А. Филиппов, В.Е. Щербинин, Н.М. Меньшиков, Н.М. Ежов, А.С. Шлеенков, Г.Г. Глинских, С.И. Ряздзевский; 3-й ряд: А.В. Куковенко, Ю.С. Субботин, В.А. Шульгин, С.Л. Ваулин, Н.И. Шакшин, Л.С. Правдин, П.А. Котов, Н.П. Лопатин



Лаборатория дефектоскопии образца 2012 г. Слева направо 1-й ряд: Н.П.Бенклевская, В.Е. Щербинин, А.С. Шлеенков, А.И. Пашагин, А.В. Куковенко, 2-й ряд: О.А. Булычев, В.А. Сосновский, Б.М. Степанов, Н.М. Лядова, М.А. Копьёв, В.Н. Щуклина, В.А. Сандовский, 3-й ряд: А.С. Краснов, Т.А. Ефремов, Д.В. Новгородов, В.Г. Рыбалко, С.В. Худорожков

- На основе разработанного метода мультиполюсных моментов эффективного эллиптического дефекта (ЭЭД) и использования возможностей матричного преобразователя получены компьютерные алгоритмы для реконструкции геометрии дефектов магистральных газопроводов по их магнитному полю в реальном масштабе времени.
- Разработаны новые физические принципы измерения напряжённости магнитного поля и теория магниточувствительных элементов (МЭ), на основе которых изготовлены по интегральной технологии матричные преобразователи высокого разрешения, являющиеся базой для построения систем магнитной дефектоскопии, микроскопии, томографии и диагностики, основанных на применении методов восстановления магнитных полей рассеяния, а также созданы быстродействующие компьютерные и автоматизированные системы для объёмно-шовной магнитной дефектоскопии электросварных и горячекатаных газонефтепроводных и насосно-компрессорных труб в технологическом потоке и в процессе эксплуатации.
- Теоретически доказана возможность измерения магнитных полей в широком диапазоне при помощи МЭ, работающих на основе анализа параметров переходных процессов, протекающих в цепях с нелинейной индуктивностью. Результаты теоретических и экспериментальных исследований нестационарных электромагнитных процессов положены в основу рекомендаций по конструированию МЭ с нелинейным колебательным контуром для

построения многоэлементных преобразователей (МП) высокого разрешения.

- Разработаны теория и принцип работы преобразователей, основанных на явлении анизотропии магнетосопротивления в тонких ферромагнитных плёнках.
- С учётом результатов исследований и разработанных рекомендаций осуществлена разработка оптимальных с точки зрения применения различных типов МЭ (феррозондов с поперечным импульсным возбуждением, преобразователей на переходных процессах, а также основанных на явлении анизотропии магнетосопротивления) конструкций матричных (многоэлементных) преобразователей и электронных схем, обеспечивающих их эффективную работу.
- Разработаны теоретические и практические основы матричных преобразователей, одновременно измеряющих две компоненты напряжённости магнитного поля в плоскости преобразователя без механического перемещения.
- С применением методов интегральной технологии синтезирован однокристалльный 256-элементный матричный тонкоплёночный преобразователь магнитного поля, на основе которого создана система магнитной микроскопии, а также магнитного сканера (МС) для считывания и визуализации остаточных полей дефектов (чувствительность МС сравнима с чувствительностью магнитопорошкового метода).
- Разработаны физические основы магнитной дефектометрии, позволившие впервые подойти к практическому воплощению идеи магнитной томографии.
- В результате математических исследований в области электродинамики развита теория вихретоковых преобразователей для неразрушающего контроля, на основе которой создан ряд приборов вихретоковой дефектоскопии и структуроскопии изделий ответственного назначения, разработан метод множественной корреляции, предназначенный для повышения разрешающей способности контроля качества термической обработки стальных изделий, создана методика, позволяющая определять марки сталей (процентное содержание легирующих элементов), и разработан способ количественной оценки фазового состояния никелевых сплавов.
- Обнаружено изменение интенсивности излучения в инфракрасной области спектра (длина волны 5–14 мкм) от участков поверхности тела, находящихся над внутренними, искусственно созданными, несплошностями, которые имитировали дефект. Ферромагнитное проводящее тело при этом намагничивалось до состояния технического насыщения и одновременно находилось в переменном электромагнитном поле. Построена теория наблюдае-

мого явления. На основе этого разработан новый метод контроля – пирозлектромагнитный, который позволяет считать информацию о дефекте со значительного расстояния, не входя в контакт с контролируемым изделием, что важно для создания высоконадёжных средств неразрушающего контроля.

- Проведены исследования в области магнитной дефектоскопии в переменных полях. Показано, что применение намагничивающих полей звуковой частоты имеет ряд преимуществ перед ультразвуковым методом. Это позволило создать автоматизированные установки для НК качества поверхности обсадных труб, которые успешно применены на Северском трубном заводе.
- Для контроля качества высокопрочных чугунов (ВПЧ) предложен и технически реализован в автоматических устройствах НК способ, при котором в деталях ответственного назначения ЭМА-методом в импульсно-резонансном режиме возбуждают упругие колебания и измеряют магнитоупругие параметры, по которым судят об их физико-механических свойствах и о размерах неметаллических включений.
- Разработан комбинированный способ электромагнитно-акустического контроля механических свойств и технологических режимов производства режущего инструмента из парамагнитных безвольфрамовых твёрдых сплавов.
- Изучено влияние дефектов КРН на несущую способность трубопроводов в зависимости от размеров трещин и уровня внутритрубного давления. Результаты исследования позволяют указать граничные условия безопасной эксплуатации труб с дефектами КРН и выполнить расчётную оценку гарантированного остаточного ресурса труб магистрального газопровода.
- Разработан способ оценки напряжённо-деформированного состояния газопровода с использованием магнитных методов контроля. Для оценки напряжённого состояния трубопроводов предложены обобщённые количественные характеристики, позволяющие проводить сравнение трубопроводов в зависимости от различных действующих факторов эксплуатации, в том числе срока наработки.
- В период с 1987 по 2017 гг. разработаны, испытаны и применены в различных отраслях промышленности более 70 установок и приборов НК. Практически все они и в настоящее время эксплуатируются на таких крупных промышленных предприятиях, как Северский трубный завод, Первоуральский новотрубный завод, Альметьевский трубный завод, Магнитогорский металлургический комбинат, АО «УралЛЮКтрубмаш», совместное узбекско-американское предприятие СП «Ташкентский трубный завод» и др.

Научные разработки, реализованные в практике или готовые к практическому применению

- Широкодиапазонный магнитометр ИФМ/Ф-2М с МЭ на основе переходных процессов. Применялся в самолётостроении и военной промышленности (для контроля размагниченности артиллерийских стволов).
- Модуляционный дефектоскоп ДВТ-24 для поиска и выявления дефектов типа поверхностных трещин в канале пушечных стволов с автоматической системой сканирования.
- Дефектоскоп МДСШ для контроля электросварных прямошовных труб диаметром (102–219) мм в технологическом потоке Северского трубного завода магнитоиндукционным методом.
- Дефектоскоп МД-32 для магнитного контроля электросварных прямошовных труб с помощью многоэлементных преобразователей на основе анализа переходных процессов. В период с 1987 по 1997 гг. создана серия установок МД-32, которые нашли широкое промышленное применение в трубной и газонефтедобывающей промышленности, а также в космической технике.
- Дефектоскоп МД-64 для контроля спиральношовных электросварных труб диаметром до 630 мм в технологическом потоке Альметьевского трубного завода.
- Дефектоскоп МД-07 для магнитного контроля качества лазерной сварки изделий ответственного назначения (применялся в военной промышленности).
- Дефектоскоп МД-25 для контроля обсадных труб на наличие поверхностных дефектов методом высокочастотного магнитного потока рассеяния. Установки контроля с применением дефектоскопа МД-25 применялись на Северском и Первоуральском трубных заводах.
- Вихретоковый прибор ИЭН-1 для измерения удельной электрической проводимости немагнитных металлов и сплавов. Прибор прошёл государственные испытания в Минске, в Белорусском республиканском центре БРЦМС и был разрешён к серийному выпуску. Приборы были внедрены на Режевском механическом заводе, на заводе им. Орджоникидзе (Челябинск), на заводе Сибсельмаш (Новосибирск), в Ногинске, в Кургане.
- Приборы типа Д7-07 и другие для контроля качества закалки ответственных серийных деталей из сталей 40Х, 30ХГСА, 38ХС и др., не поддающихся контролю коэрцитиметрами, были внедрены на Режевском механическом заводе, на заводе им. Орджоникидзе (Челябинск), на заводе Сибсельмаш (Новосибирск), в Ногинске, в Кургане. Прибор Д7-07 экспонировался на международной выставке и был удостоен золотой медали.

- Толщиномер никелевого покрытия на стальной основе. Прибор был внедрён на Химмаше и использовался для измерения толщины никелевого покрытия на листах, использующихся для обшивки корпусов кораблей и подводных лодок.
- Толщиномер хромового покрытия в короткоствольном устройстве на корпусе БМП (Курган).
- Вихретоковый твердомер ВТТ-2 для контроля твёрдости корпусов снарядов (Высокогорский механический завод, Нижний Тагил).
- Комплект тонкоплёночных матричных преобразователей, предназначенных для решения различных задач НК и диагностики.
- Компьютеризированная, полностью автоматизированная установка УМД-101М для магнитной дефектоскопии сварного шва и тела электросварных нефтегазопроводных труб диаметром (20–219) мм по всему объёму (всей толщине стенки) в технологическом потоке их производства, вблизи трубоэлектросварочного агрегата, там, где труба ещё непрерывна (то есть НК идёт без вращения трубы).
- Впервые в мировой практике успешно внедрена в промышленности установка для автоматизированного контроля качества сварного шва и околошовной зоны толстостенных (до 16 мм) прямошовных электросварных труб диаметром (219–530) мм. На Северском трубном заводе (трубоэлектросварочный стан ЗАО «ТМК-КПВ») выполнен сравнительный анализ выявляемости дефектов при контроле электросварных труб диаметром до 530 мм с помощью установки магнитной дефектоскопии УМД-121 (разработки ИФМ) и ультразвуковой установки компании «Krautkramer». В процессе испытаний были получены одинаковые результаты.
- Компьютеризированная, полностью автоматизированная установка УМД-104М для магнитной дефектоскопии насосно-компрессорных (НКТ) и других труб нефтяного сортамента, обеспечивающая полностью автоматизированный НК труб с навинченными муфтами. В НК «ЛУКОЙЛ» проведены презентация и сравнительные испытания установки УМД-104М с дефектоскопом компании «Tuboscope.Vetco». В процессе испытаний получены одинаковые результаты.
- Портативный полуавтоматический магнитный дефектоскоп для НК качества резьбы насосно-компрессорных труб в процессе их изготовления и при восстановлении НКТ, бывших в эксплуатации.
- Магнитный сканер (МС) для считывания и визуализации остаточных полей дефектов с чувствительностью, сравнимой с чувствительностью магнитопорошкового метода НК.

- МС для системы установки дистанционного автоматизированного магнитного контроля изнутри трубопроводной обвязки компрессорных станций ОАО «Газпром» (внутри-трубная диагностика).
- Разработан новый метод выявления микротрещин в металлических изделиях при возбуждении в них высокочастотных вихревых токов и фиксации температурного рельефа с помощью инфракрасной камеры. Чувствительность по наружному раскрытию составляет 8 мкм, что соответствует уровню Б для магнитопорошкового контроля. Реализация данного метода технологически более проста по сравнению с магнитопорошковым, что позволит во многих задачах контроля заменить последний. Показано, что при соотношении длины трещины к её глубине более чем в три раза высокочастотные вихревые токи при пересечении трещины протекают внутри по её граням, что приводит к дополнительному нагреву и увеличению температурного контраста по отношению к остальной поверхности.
- Магнитоанизотропный преобразователь для определения и мониторинга уровня напряжений на наружной поверхности стенки труб, находящихся в трубопроводной обвязке газо-компрессорных цехов.
- Портативный дефектоскоп для магнитной дефектоскопии с использованием магнитных индикаторных пакетов (МИП), обеспечивающий возможность записи и стирания изображений магнитных полей рассеяния дефектов при магнитопорошковом контроле изделий.
- Способ контроля, основанный на изменении электросопротивления магнитной суспензии в зоне дефекта при магнитопорошковом контроле, позволяющий наряду с визуальной индикацией количественно оценивать величину магнитного поля и геометрические параметры дефектов (оформлена заявка на патент, получено положительное решение).

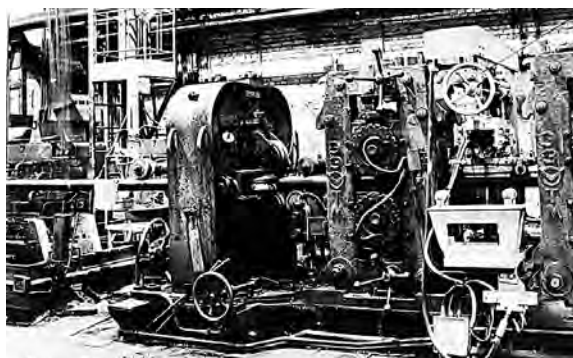
За всю историю лаборатории в ней были выполнены и защищены 5 докторских и 14 кандидатских диссертаций. Сотрудники лаборатории отмечены различными научными премиями. Опубликовано 8 монографий. В настоящее время в лаборатории работают 1 чл.-корр. РАН, 3 доктора наук и 3 кандидата наук. Лаборатория располагает современным оборудованием, позволяющим проводить измерения магнитных полей дефектов в диапазоне (0,01–1000) А/см, и вычислительной техникой для проведения на современном уровне расчётов различных физических полей и компьютерного моделирования.

Установки и приборы неразрушающего контроля, нашедшие наибольшее практическое применение в промышленности

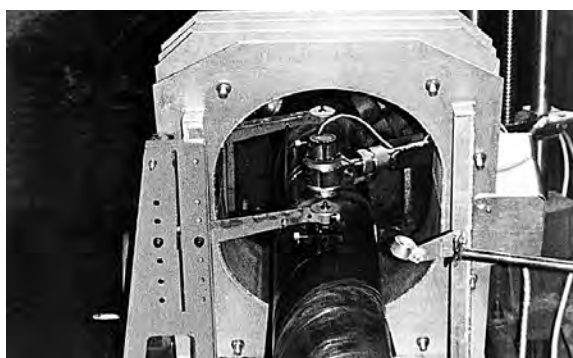
Разработаны и внедрены магнитные комбинированные системы для непрерывного контроля и идентификации дефектов электросварных труб в процессе производства новых труб или дефектоскопии труб, бывших в эксплуатации. Автоматизированные системы контроля позволяют сканировать трубы с вращением и без него. В ранних установках использованы МП на основе переходных процессов (дефектоскоп МД-32) и магнитоиндукционные преобразователи (дефектоскоп МДСШ), которые обладают высокой чувствительностью и позволяют выявлять как поверхностные, так и объёмные дефекты бесконтактным способом с большим зазором и с высокой скоростью.

Экспериментальные исследования нестационарных переходных процессов показали, что МЭ с нелинейным колебательным контуром по основным параметрам не уступают феррозондам, а по диапазону регистрируемых полей значительно превосходят последние (до 300 А/см в линейном режиме и более 500 А/см в нелинейном режиме). На их основе создан широкодиапазонный Магнитометр ИФМ/Ф-2М.

В рамках решения проблемы обеспечения технологической независимости и импортозамещения для нужд стратегических отраслей в Институте физики металлов им. Михеева Уральского отделения РАН разработан и внедрен на ряде промышленных предприятий России и СНГ серия автоматизированных установок магнитной дефектоскопии всего тела прямошовных электросварных труб диаметром (20–219) мм в технологическом потоке их производства, вблизи трубоэлектросварочного агрегата, в месте, где труба непрерывна и движется без вращения. Установки являются неотъемлемой частью технологического процесса изготовления электросварных труб, удовлетворяют всем требованиям международных стандартов ISO 10893-1:2011, ISO 10893-3:2011, ASTM E570-91 и являются конкурентоспособными



Дефектоскоп МДСШ для магнитного контроля электросварных прямошовных труб диаметром (102–219) мм



Дефектоскоп МД-64 для контроля спиральношовных электросварных труб диаметром до 630 мм

на мировом рынке. Оработана технология серийного изготовления установок типа УМД-101М для магнитного контроля электросварных труб по всему объёму. Разработана и внедрена в ОАО «СТЗ» установка УМД-121 для магнитного контроля качества сварного шва и металла околошовной зоны (шириной до 140 мм) прямошовных электросварных труб диаметром (168–530) мм и толщиной стенки до 16 мм.

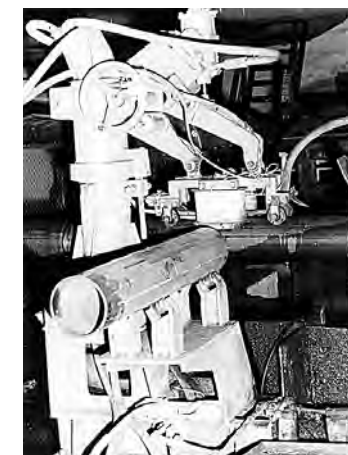
В их основе – однокристалльные тонкоплёночные матричные преобразователи (МП), изготовленные с применением современных технологий. В качестве магниточувствительных элементов (МЭ) в них использованы преобразователи на эффекте анизотропии магнетосопротивления в ферромагнитной плёнке, в которых реализован предложенный нами новый принцип измерения напряженности магнитного поля. Конструкция МП, их геометрические размеры и количество МЭ видоизменялись в зависимости от задачи контроля.

На основе применения МП созданы установки магнитного НК, которые уже нашли широкое промышленное применение. Так, дефектоскопический комплекс УМД-101МК для магнитного контроля электросварных труб диаметром (20–114) мм по всему периметру был внедрён в ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» в 2014 г.

Одной из важнейших технологических операций по восстановлению насосно-компрессорных труб, бывших в эксплуатации, является неразрушающий контроль, по результатам которого и определяется дальнейшая судьба труб повторного применения. От эффективности применяемого средства НК и достоверности его показаний зависит надёжность и безопасность работы всей нефтедобывающей установки, поэтому выбор оптимальных средств НК является весьма актуальной задачей.

Существующие отечественные магнитные дефектоскопы не удовлетворяют потребителей как морально устаревшие и практически недееспособные в жестких условиях контроля качества и измерения толщины стенки трубы НКТ. Из известных зарубежных стационарных магнитных дефектоскопов для контроля НКТ на трубных базах нефтедобывающих компаний чаще всего используются дорогостоящие установки «Vetoscope С» компании «TuboscopeVetco». Все вышеперечисленные моменты учтены в установке УМД-104М, которая была создана в результате совместной разработки ИФМ УрО РАН и ООО «СТАЛЛ», г. Пермь.

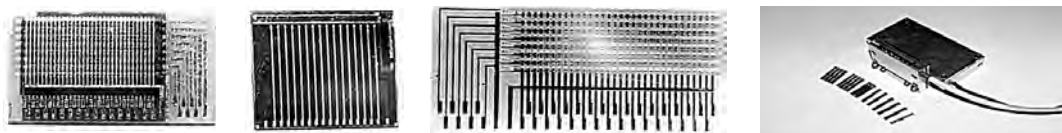
В современной комплектации установка УМД-104М может быть использована для магнитной дефектоскопии НКТ, СБТ и обсадных труб диаметром (48–114) мм, толщиной стенки до 8 мм



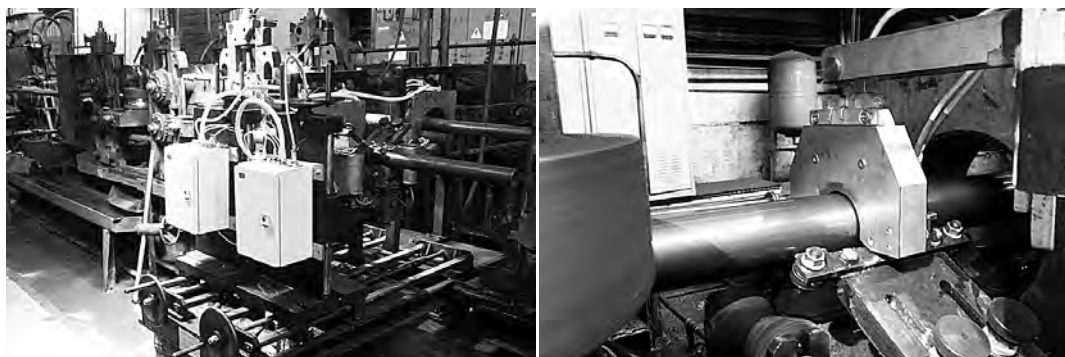
Дефектоскоп МД-32 для магнитного контроля электросварных прямошовных труб диаметром (102–219) мм



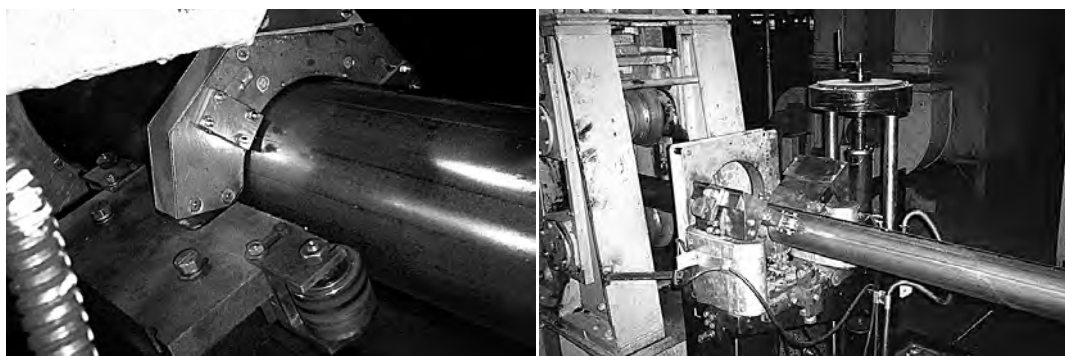
Магнитометр ИФМ/Ф-2М



Основные типы синтезированных матричных преобразователей



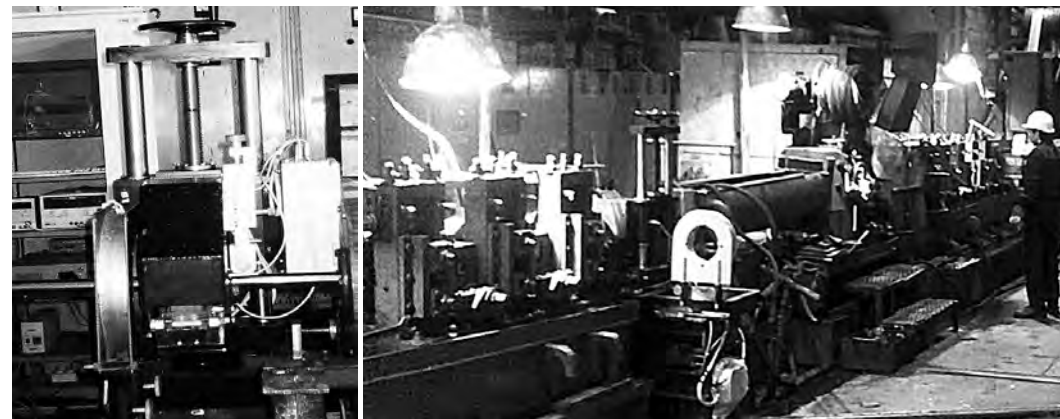
Дефектоскопический комплекс УМД-101МК для магнитного контроля электросварных труб диаметром (20–114) мм по всему периметру



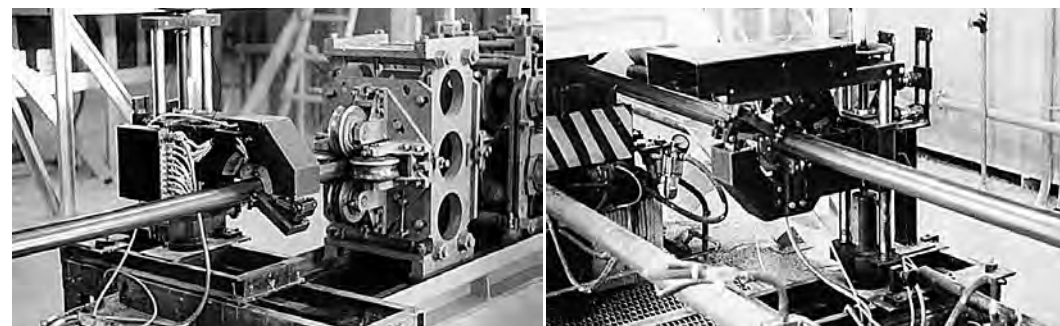
Установка УМД-101М для магнитной дефектоскопии сварных соединений и тела электросварных труб: слева – измерительная позиция для НК верхней части трубы; справа – измерительная позиция для НК нижней части трубы

(возможно расширение диапазона диаметров до 426 мм и толщины стенки до 16 мм) в процессе их изготовления или входного контроля, а также при восстановлении труб, бывших в эксплуатации (труб повторного применения).

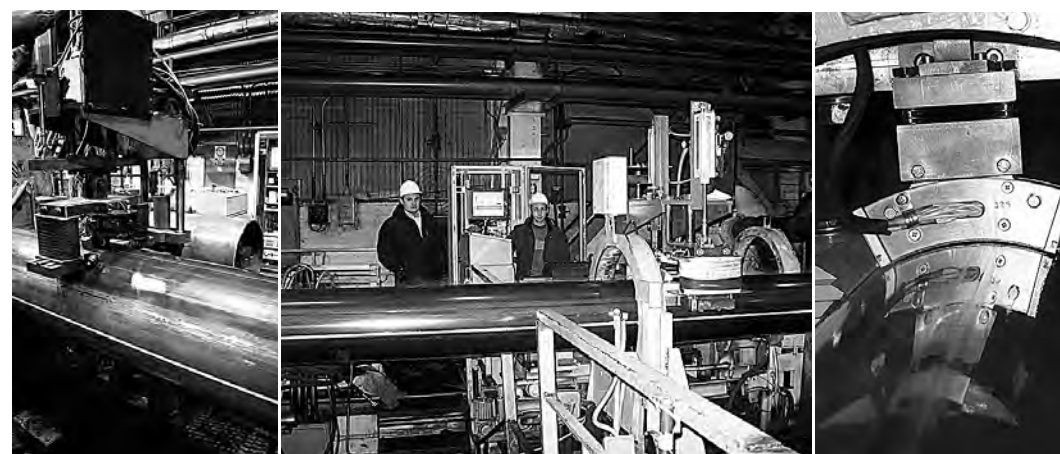
В период с 2011 по 2014 гг. в НК «ЛУКОЙЛ» поставлены три модернизированные установки УМД-104М и проведена их презентация – сравнительные испытания с аналогичным дефектоскопом компании «TuboscopeVetco». В процессе испытаний были получены одинаковые результаты (доказана возможность импортозамещения).



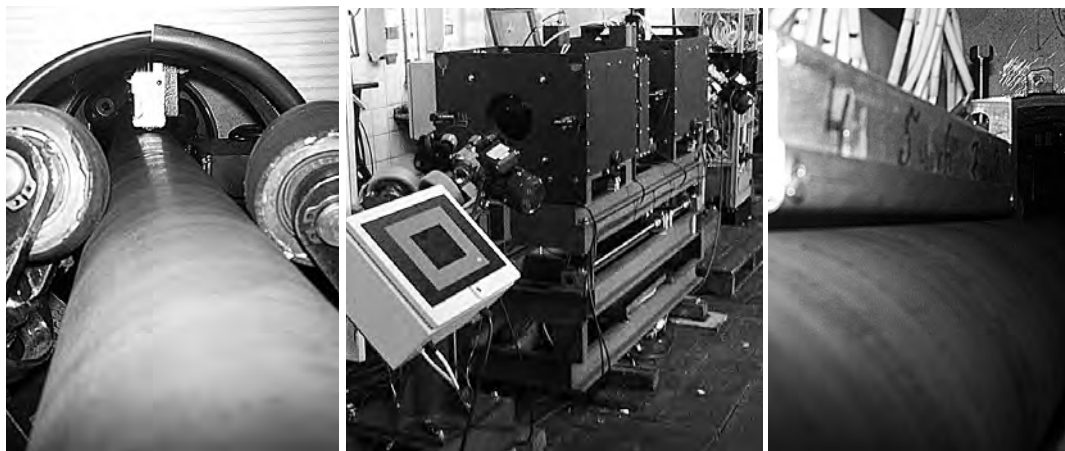
Установка УМД-101М для магнитной дефектоскопии сварных соединений и тела электросварных труб диаметром (20–114) мм



Установка УМД-101М для магнитной дефектоскопии сварных соединений и тела электросварных труб диаметром (20–159) мм: слева – измерительная позиция для НК верхней части трубы; справа – измерительная позиция для НК нижней части трубы



Установка УМД-121 для НК качества сварного шва и околошовной зоны электросварных труб диаметром (168–530) мм



Внешний вид установки УМД-104М

Докторские диссертации, выполненные в лаборатории дефектоскопии:

В.Е. Щербинин «Магнитоферрозондовый и магнитографический методы выявления дефектов плоскости и измерения толщины» (1981 г.).

В.А. Сандовский «Решение задач электродинамики в вихретоковом контроле и развитие электромагнитных методов определения механических свойств изделий» (1989 г.).

Ю.П. Сурков «О влиянии жидкометаллической среды на механические свойства сталей» (1984 г.).

А.С. Шлеенков «Разработка матричных преобразователей магнитного поля применительно к неразрушающему контролю ферромагнитных изделий и сварных соединений» (1998 г.).

А.Н. Печенков «Алгоритмы расчётов и моделирования прямых и обратных задач магнитостатической дефектоскопии и устройств технической магнитостатики» (2007 г.).

Кандидатские диссертации, выполненные в лаборатории дефектоскопии

В.А. Комаров «Изучение магнитных полей вблизи поверхностных неоднородностей проводящих ферромагнитных тел применительно к вихретоковой дефектоскопии» (1972 г.).

А.И. Пашагин «Исследование магнитостатического поля поверхностных и внутренних дефектов в условиях неоднородного намагничивания применительно к контролю цилиндрических тел» (1976 г.).

Г.И. Деордиев «Разработка методов и средств измерения магнитострикции» (1978 г.).

М.Л. Шур «Расчёт магнитостатических полей дефектов типа нарушений плоскости в ферромагнитных изделиях методами математической физики» (1980 г.).

Л.С. Правдин «Исследование магнитоупругих эффектов в ферромагнетиках и возможности их использования в неразрушающем контроле термической обработки сталей» (1980 г.).

В.Г. Рыбалко «Влияние структуры на жидкометаллическое охрупчивание сталей» (1981 г.).

А.С. Шлеенков «Исследование магнитопорошкового метода применительно к контролю бурового оборудования и инструмента» (1983 г.).

В.А. Шульгин «Теоретическое исследование электромагнитно-акустического преобразования в проводящих магнито-поляризованных стержнях применительно к задачам неразрушающего контроля» (1984 г.).

С.П. Михайлов «Исследование свойств магнитной ленты как промежуточного носителя информации в магнитографической дефектоскопии» (1988 г.).

Р.В. Загидуллин «Экспериментальное исследование и аналитическое описание магнитостатического поля поверхностного дефекта типа трещины в нелинейной ферромагнитной среде» (1988 г.).

Л.Н. Кротов по магнитной дефектоскопии (1988).

В.А. Бурцева «Магнитоупругие эффекты в ферромагнетиках и их использование для контроля механических свойств высокопрочных чугунов» (1990 г.).

Р.С. Мельник «Анализ возможностей метода восстановления магнитного поля применительно к магнитной дефектоскопии» (1991 г.).

О.А. Булычев «Матричные преобразователи магнитного поля, основанные на явлении анизотропии магнетосопротивления в тонких ферромагнитных пленках» (1997 г.).

Научные премии сотрудников лаборатории дефектоскопии

1. Премия правительства РФ за создание и промышленную реализацию технологий и средств неразрушающего контроля и диагностики строительных конструкций, В.Е. Щербинин (в составе авторского коллектива), 1996 г.

2. Премия правительства РФ за разработку и внедрение новых нестандартных технологических комплексов для повышения безопасности и конкурентоспособности нефтепромыслового оборудования, А.С. Шлеенков (в составе авторского коллектива), 2003 г.

3. Премия им. члена-корреспондента М.Н. Михеева, В.В. Лопатин, 2003 г.

4. Премия им. члена-корреспондента М.Н. Михеева, В.Е. Щербинин, А.Н. Печенков, 2004 г.

5. Золотая медаль Международной ярмарки (г. Пловдив, Болгария) за разработку дефектоскопа Д7-07, В.А. Сандовский, 1982 г.

6. Медаль ВДНХ СССР за разработку, изготовление и внедрение магнитометра феррозондового, М.А. Копьев, 1980 г.

7. Медаль ВДНХ СССР за разработку, изготовление и внедрение дефектоскопа импульсного роликового ДИР-1, Д.А. Штуркин, Н.П. Лопатин, 1983 г.

8. Медаль ВДНХ СССР за разработку, изготовление и внедрение дефектоскопа для контроля швов электросварных труб типа МДСШ, Б.А. Филиппов, 1983 г.

9. Диплом по итогам выставки «Вклад молодежи в научно-технический прогресс», А.С. Зельский, М.А. Копьев (в составе авторского коллектива), 1985 г.

10. Диплом по итогам выставки «Стандартизация, метрология и измерительная техника в строительстве», Г.И. Деордиев, 1985 г.

11. Диплом по итогам выставки «Научно-технический прогресс-85), В.Е. Щербинин, М.А. Копьев, Б.М. Степанов, Г.В. Воронин, 1985 г.

12. Диплом ВДНХ СССР за разработку дефектоскопов МД-32ФД-1Е и МД-25НД-1Е, М.А. Копьев, А.С. Шлеенков, А.И. Пашагин, 1987 г.

А.С. Шлеенков

Список монографий сотрудников лаборатории дефектоскопии

1. С.П. Михайлов, В.Е. Щербинин, *Физические основы магнитографической дефектоскопии*, Наука, Москва (1992), 240 с.
2. В.Е. Щербинин, Э.С. Горкунов, *Магнитный контроль качества металлов*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (1996), 263 с.
3. А.П. Дегтерев, В.В. Клюев, В.Е. Щербинин и др., в кн. *Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник*. Под ред. В.В. Клюева, Машиностроение, Москва (2003), С. 329.
4. А.Н. Печенков, В.Е. Щербинин, *Некоторые прямые и обратные задачи технической магнитостатики*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2004), 178 с.
5. С.В. Алимов, И.А. Долгов, В.А. Горчаков, А.Ю. Сурков, Ю.П. Сурков, В.Г. Рыбалко, *Диагностика коррозионного растрескивания газопроводов*, Атлас, Под ред. Ю.П. Суркова, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2004), 84 с.
6. В.Г. Антонов, А.Б. Арабей, В.Н. Воронин, И.А. Долгов, М.М. Кантор, З. Кношински, Ю.П. Сурков, *Коррозионное растрескивание под напряжением труб магистральных газопроводов*, Атлас, Под общ. ред. А.Б. Арабея и З. Кношински, Наука, Москва (2007), 105 с.
7. В.В. Дякин, В.А. Сандовский, *Теория и расчёт накладных вихретоковых преобразователей*, Наука, Москва (1981), 135 с.
8. В.В. Дякин, В.А. Сандовский, *Задачи электродинамики в неразрушающем контроле*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2008), 390 с.

ЛАБОРАТОРИЯ

КОМПЛЕКСНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Смородинский Яков Гаврилович, заведующий лабораторией, д.т.н., профессор
- Агзамова Полина Александровна, научный сотрудник
- Бызов Александр Викторович, инженер-исследователь
- Василенко Ольга Николаевна, научный сотрудник, к.т.н.
- Гобов Юрий Леонидович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Грамматин Андрей Владиславович, ведущий инженер
- Колесниченко Ирина Всеволодовна, ведущий документовед
- Корзунин Геннадий Семенович, главный научный сотрудник, д.т.н., профессор
- Костин Владимир Николаевич, главный научный сотрудник, д.т.н., доцент
- Литвиненко Леонид Аркадьевич, ведущий инженер
- Лукиных Николай Петрович, ведущий инженер
- Михайлов Алексей Вадимович, младший научный сотрудник
- Новослугина Анастасия Петровна, младший научный сотрудник
- Счастливая Елена Константиновна, старший лаборант
- Фелелов Александр Григорьевич, ведущий электроник

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ КОМПЛЕКСНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

Лаборатория комплексных методов контроля была организована в апреле 2007г. на базе лаборатории электромагнетизма.

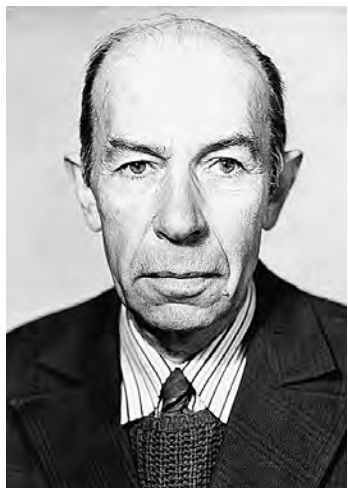
Лаборатория электромагнетизма была создана практически одновременно с Институтом и проработала в общей сложности 75 лет. С момента образования лабораторией руководил выдающийся учёный Рудольф Иванович Янус – основатель магнитной дефектоскопии, создатель и первый главный редактор журнала «Дефектоскопия». Под руководством Р.И. Януса работали будущие член-корреспондент АН СССР Я.С. Шур и академик АН СССР С.В. Вонсовский, которые в годы Великой Отечественной войны успешно занимались контролем качества корпусов артиллерийских снарядов. В 1944 г. из лаборатории выделилась лаборатория ферромагнетизма, которую возглавил Я.С. Шур.

В послевоенные годы в области неразрушающего контроля, а также в области новых методов и средств уникальных магнитных измерений работала целая плеяда выдающихся учёных, таких как М.А. Веденев, В.И. Дрожжина, Н.Н. Зацепин, Ю.А. Вдовин, Ю.Я. Реутов, В.В. Власов, Л.А. Фридман, Д.Л. Штуркин, Н.М. Родигин, В.Е. Щербинин. У каждого из них были оригинальные разработки, имеющие важное научное и практическое значение.

В январе 1966 г. в возрасте 63 лет скоропостижно скончался Р.И. Янус.



Р.И. Янус



П.А. Халилеев

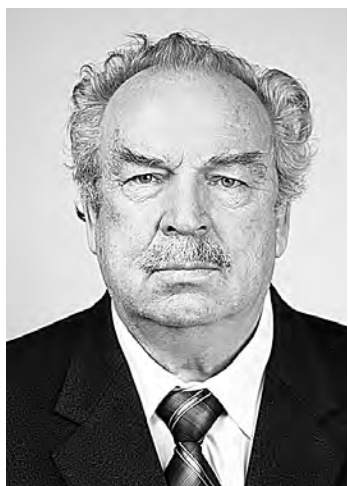
Это была большая утрата как для лаборатории электромагнетизма, так и для всего научного мира. Лабораторию возглавил замечательный учёный Павел Акимович Халилеев, бывший к тому времени уже дважды лауреатом Ленинской и Государственной премий за разработку методов обнаружения затонувших во время войны кораблей и осуществление их подъёма на поверхность, а также за разработку метода разделения изотопов урана на секретном предприятии в период создания атомной бомбы. Вообще, Павлу Акимовичу было свойственно браться за решение глобальных проблем. В конце 80-х годов он явился инициатором, разработчиком теории и одним из главных создателей первого внутритрубного дефектоскопа для контроля металла труб магистральных газопроводов, уложенных в грунт. Все последующие годы Павел Акимович с успехом занимался развитием магнитной внутритрубной дефектоскопии, которая к настоящему времени превратилась в целую научно-производственную отрасль с миллиардными оборотами.

В 1970 г. из лаборатории электромагнетизма выделена лаборатория дефектоскопии во главе с Н.Н. Зацепиным. Заведующим лабораторией дефектоскопии после избрания Н.Н. Зацепина членом-корреспондентом Белорусской Академии Наук и его отъезда в г. Минск стал Виталий Евгеньевич Щербинин.

В 1985 г. после перехода П.А. Халилеева в научные консультанты, заведующим лабораторией электромагнетизма был назначен Геннадий Семенович Корзунин. Это назначение вызвало удивление у некоторых сотрудников Института, поскольку был велик контраст – никому неизвестный кандидат физ.-мат. наук и предшествующие ему корифеи. Тем не менее, по руководством Г.С. Корзунина лаборатория электромагнетизма проработала ещё 20 лет. Продолжалась работа по внутритрубной дефектоскопии. Организацию

трубной диагностики в промышленных масштабах взял на себя талантливый московский менеджер В.А. Канайкин. В организованное В.А. Канайкиным научно-производственное объединение «Спектр» из лаборатории электромагнетизма перешла группа Б.В. Патраманского.

В самой лаборатории электромагнетизма разрабатывались новые магнитометры, полюсоискатели, металлоискатели, текстурометры и другие специализированные магнитоизмерительные устройства, большинство из которых нашли применение на предприятиях страны. Многие приборы были награждены медалями ВДНХ. Разработанный под руководством Г.С. Корзунина магнит-



Г.С. Корзунин



Лаборатория электромагнетизма образца 1977 г.
 Стоят: Зурочка Инна, Чернова Галина Степановна, Уварова Марина Петровна, Лаврентьев Алексей Григорьевич, Дрожжина Валентина Ивановна, Холин Борис Васильевич, Реутов Юрий Яковлевич, Табачник Вера Павловна.
 Сидят: Лapidус Борис Михайлович, Пономарев Юрий Федорович, Корзунин Геннадий Семенович, Фридман Лев Хацкелевич, Рубцов Валерий



Лаборатория электромагнетизма образца 2002 г.



Я.Г. Смородинский

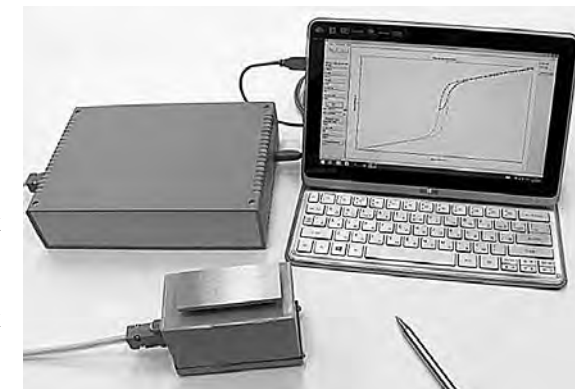
ный текстурометр был отмечен золотой медалью Лейпцигской ярмарки. На основе разработанного способа определения степени совершенства кристаллографической текстуры в анизотропной электротехнической стали был налажен контроль качества в движущейся полосе стали в цехе холодной прокатки АО «Виз-сталь».

Такое славное наследие получила 10 лет назад лаборатория комплексных методов контроля. Заведующим лабораторией с 2007 г. является доктор технических наук, профессор Яков Гаврилович Смородинский. В настоящее время в лаборатории КМК работает 16 сотрудников, из них доктора наук: Я.Г. Смородинский, Г.С. Корзунин, В.Н. Костин, а также кандидаты наук: Ю.Л. Гобов, О.Н. Василенко. Основными научными направлениями работы лаборатории являются разработка новых многопараметровых методов и программно-аппаратных средств магнитной, магнитоакустической и вихретоковой структуроскопии материалов и изделий (рук. В.Н. Костин), а также совершенствование методов и средств бесконтактной электромагнитоакустической дефекто-



Лаборатория комплексных методов контроля образца 2012 г. Слева направо сидят: И.В. Колесниченко, Г.С. Корзунин, Е.К. Счастлиная, Я.Г. Смородинский, О.Н. Василенко; стоят: А.В. Грамматин, А.П. Новослугина, В.Н. Костин, А.Г. Фелелов, Ю.Л. Гобов, Л.А. Литвиненко, А.В. Михайлов.

скопии (рук. Я.Г. Смородинский). Так, была разработана современная мобильная программно-аппаратная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M, предназначенная для практической реализации одно- и многопараметровых магнитных методов контроля физико-механических свойств и напряженно-деформированного состояния изделий как в условиях производства, так и при диагностике в полевых условиях. Компьютеризованная система позволяет в автоматическом режиме с помощью локальных преобразователей проводить измерение параметров петли гистерезиса, выполнять предварительную обработку и визуализацию измеренных данных, запоминать, накапливать и проводить комплексный анализ результатов, сопоставлять полученную информацию с электронными базами данных. Также совместно с ЗАО НПО «Интротест» и НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ имени Н.Э. Баумана в лаборатории был разработан ультразвуковой бесконтактный сканер-дефектоскоп «Автокон-ЭМА-МГТУ» для бесконтактного наружного ультразвукового контроля основного металла труб при ремонте газопроводов, разработанный. В основу работы сканера заложен принцип ввода ультразвуковой волны в тело объекта контроля с помощью электромагнитоакустического преобразователя через зазор. Дефектоскоп позволяет за один проход вдоль трубы проконтролировать все сечения трубы на наличие дефектов и утонений стенки. Конструкция привода и системы слежения за швом прибора «Автокон-ЭМА-МГТУ» позволяет ему передвигаться как вдоль продольного сварного шва с автоматическим слежением (при этом достигается максимальная выявляемость дефектов



Мобильная программно-аппаратная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M.



Ультразвуковой бесконтактный сканер-дефектоскоп «Автокон-ЭМА-МГТУ».



Ю.Л. Гобов и П.А. Агзамова на специализированной выставке с международным участием «Сварка. Контроль и диагностика», 2014 г.

по всему телу трубы), так и по произвольной траектории при углах до 20° относительно продольного шва. Это существенно упрощает установку и снятие прибора с трубы, а главное, значительно повышает безопасность работы.

Наконец, стоит отметить, что сотрудники лаборатории КМК публикуются в высокорейтинговых журналах из списка WoS и SCOPUS, таких, например, как «Дефектоскопия», «Акустический журнал», «Деформация и разрушение» и принимают участие в региональных и всероссийских выставках. За 10 лет существования в лаборатории защищены две кандидатские диссертации (О.Н. Василенко, 2014 г. и П.А. Агзамова, 2017 г.) и в настоящее время представлена к защите кандидатская диссертация А.В. Михайлова.

Г.С. Корзунин, В.Н. Костин

ЛАБОРАТОРИЯ

магнитного структурного анализа

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Ничипурук Александр Петрович, заведующий лабораторией, д.т.н.
- Вшивцев Игорь Витальевич, ведущий инженер
- Ежов Игорь Вячеславович, инженер-исследователь
- Казанцева Наталия Васильевна, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Коган Леонид Хонович, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Козлова Татьяна Леонидовна, старший электроник
- Коробицын Владимир Григорьевич, токарь 6 разряд
- Корх Михаил Константинович, младший научный сотрудник
- Кулеев Владимир Гайнитдинович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Михеев Андрей Михайлович, инженер
- Огнева Мария Сергеевна, младший научный сотрудник
- Ригмант Михаил Борисович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Сажина Елена Юрьевна, научный сотрудник
- Сташков Алексей Николаевич, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Сурин Дмитрий Геннадьевич, монтажник радиоэлектр. аппаратуры 6 разряд
- Фролова Светлана Сергеевна, ведущий документовед
- Худяков Борис Анатольевич, главный специалист
- Царькова Татьяна Павловна, старший научный сотрудник, к.т.н.

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ МАГНИТНОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

История создания лаборатории магнитного структурного анализа неразрывно связана с научной и организаторской деятельностью легендарного первого директора Института физики металлов Михаила Николаевича Михеева и историей нашего государства. В 1937 г. на директора УралФТИ обрушиваются несправедливые гонения, он отстраняется от должности директора. Михаил Николаевич с головой уходит в научную работу. За удивительно короткое время он добился существенных успехов в ряде собственных разработок, связанных с магнитным методом неразрушающего контроля качества изделий из сталей. Уже весной 1938 г. им был налажен магнитный контроль труб на Первоуральском новотрубном заводе [1]. Там впервые успешно опробован в промышленных условиях его коэрцитиметр, вошедший в историю отечественного неразрушающего контроля под именем коэрцитиметра Михеева. Позднее прибор получил название КИФМ (коэрцитиметр Института физики металлов).

В период войны М.Н. Михеев не был директором, зато он смог прекрасно реализовать себя как физика-экспериментатора, способного решать важные производственные проблемы. В 1945 г. был награжден орденом «Знак Почёта» и медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.».



М.Н. Михеев



Первая модель коэрцитиметра. Внедрён в 1938 г. на Первоуральском Новотрубном заводе

В 1951 г. за разработку и внедрение новых методов контроля структуры и фазового состава стальных изделий после различной термической обработки Михаилу Николаевичу присвоено звание лауреата Государственной премии СССР. Так был отмечен его личный вклад в Победу.

За все годы войны Михеев лишь один раз просил командировку по личному делу – для защиты диссертации на учёную степень кандидата технических наук. Его оппонент академик А.П. Александров на защите сказал: «с защитой этой диссертации авторитет Уралфизтехы вырос ещё больше».

С 1945 г. Михеев директор Института, в 1948 г. его опять снимают с должности.

В 1953 г. Михаил Николаевич вернулся в кресло директора и работал бессменно в этой должности до 1986 г.

В январе 1953 г. М.Н. Михеев создаёт свою лабораторию, которая в 1959 г. стала называться лабораторией магнитного структурного анализа (МСА). Его обширный и успешный опыт в разработке магнитных методов контроля металлопродукции позволил сформулировать основные научные направления, которых лаборатория придерживается до настоящего времени:

- исследования магнитных, механических и электрических свойств сталей после различных термических обработок;



1958 г. 1-ый ряд справа налево: Н.П. Якшина, С.В. Леонтьев
2-ой ряд: В.П. Селяхина, В.М. Морозова, М.М. Беленкова, И.П. Колобов
3-ий ряд: П. Рудоманов, Б.М. Неизвестнов, Г.В. Сурин

- изучение магнитных свойств слабомагнитных металлов после разных воздействий;
- изучение влияния упругопластических деформаций на магнитные свойства материалов ответственных конструкций (в первую очередь это касалось корпусов кораблей и авиадеталей).

Для оперативного решения важных для промышленности страны задач при лаборатории была создана мастерская, в которой от момента образования и до 1976 г. работал С.В. Леонтьев, мастер на все руки, приехавший с Михаилом Николаевичем из Ленинграда.

В 1958 г. Михееву присуждена степень доктора технических наук.

В 1966 г. он основал журнал «Дефектоскопия» – единственный в то время в СССР журнал по неразрушающему контролю – и стал его главным редактором.

С 1974 по 1986 г. М.Н. Михеев занимал должность председателя научного совета АН по проблеме «Физические неразрушающие методы контроля», на который были возложены функции национального комитета.

В 1979 г. Михаил Николаевич был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР.

Организаторский талант Михеева, умевшего решать проблемы государственного масштаба, отразился и в подборе сотрудников его лаборатории. Первое из указанных выше научных направлений возглавила Валентина Михайловна Морозова, второе – М.М. Беленкова, третье – Б.М. Неизвестнов. Практически все коэрцитиметры серии КИФМ прошли через руки Г.В. Сурина.

В образованную в 1953 г. новую лабораторию Валентина Михайловна Морозова перешла от Я.С. Шура. Она была сотрудницей

института с 1949 по 1991 г. Со временем В.М. Морозова стала ближайшей коллегой и соавтором многих основных научных работ М.Н. Михеева. Валентина Михайловна была его надёжной опорой в решении вопросов, связанных с жизнью лаборатории. С 1972 г. она официально являлась заместителем заведующего лабораторией МСА. Валентина Михайловна обладала широкой эрудицией, высокой научной квалификацией, была принципиальным и волевым руководителем. Как шутили сотрудники, лаборатория имела и «папу» и «маму».

В.М. Морозова с сотрудниками проводили исследование структур-



В.М. Морозова

ных и фазовых превращений, магнитных, электрических и механических свойств сталей и чугунов различного химического состава после различных упрочняющих обработок (термической, химико-термической, деформационной). Изучение процессов перемангничивания в ферромагнитных конструкционных материалах во взаимосвязи со структурным состоянием и фазовым составом легло в основу теоретического обоснования методов магнитного структурного анализа термообработанных стальных изделий.

Следует отметить, что объектами исследования явились стали тех марок и изделия из них, магнитный контроль которых был востребован на промышленных предприятиях, т.е. лаборатория выполняла большой объём хозяйственных работ. Как правило, окончание договора заканчивалось разработкой методики и при-

боров неразрушающего магнитного контроля и их внедрением в производство. Михаил Николаевич всегда стремился связать деятельность лаборатории с нуждами производства. Он считал, что именно там научные сотрудники должны искать реальные задачи.

Исследование взаимосвязей магнитных и механических свойств ферромагнитных сталей после различных термических обработок позволило определить возможности и ограничения коэрцитиметрического метода контроля. В лаборатории непрерывно идёт работа по усовершенствованию измерительной системы и приставных преобразователей коэрцитиметра [2–4].

Трудами М.Н. Михеева заложены основы неразрушающего контроля поверхностно-упрочнённых слоёв на деталях с помощью приставных электромагнитов. Впоследствии эти работы были продолжены Э.С. Горкуновым и Г.В. Бидой. Внедрён контроль качества закалки с нагрева ТВЧ зубьев коронных шестерён трактора, коренных и шатунных шеек коленвалов автомобилей и др. Работы В.М. Морозовой, Г.В. Биды и Г.В. Сурина способствовали тому, что все долотные заводы СССР использовали коэрцитиметры КИФМ для кон-



Коэрцитиметр КИФМ-1 в 1974 г. прошёл государственную аттестацию



Коэрцитиметр КИФМ-1X, является модификацией коэрцитиметра КИФМ-1



Слева направо – Г.В. Сурин, В.М. Морозова, Э.С. Горкунов, М.М. Беленкова

троля глубины и твёрдости цементированных слоёв на беговых дорожках бурильного инструмента (лапы, шорожки).

М.Н. Михеев совместно с М.В. Якутовичем положил начало неразрушающему методу контроля механических свойств стального проката. Дальнейшие работы его аспиранта Л.В. Кохмана и Г.В. Биды привели к внедрению коэрцитиметрического метода контроля прочностных и пластических свойств труб из углеродистых сталей общего назначения на Первоуральском новотрубном заводе; прочностных, пластических и вязких свойств листового и сортового проката на Нижнетагильском металлургическом комбинате. Итогом этих работ стали Государственные приёмочные испытания коэрцитиметра КИФМ-1 и разработка ТУ-14-1016-74 «Сталь деформированная. Методы неразрушающего магнитного контроля механических свойств, разрешающих определение прочностных и пластических свойств по коэрцитивной силе». Таким образом, вся чёрная металлургия СССР стала применять коэрцитиметры для неразрушающего контроля механических свойств листов, сортового проката, труб.

Разработанные в лаборатории коэрцитиметры широко применялись на многих заводах страны. Так, например, коэрцитиметр КИФМ-1 был внедрён более чем на 200 предприятиях. На одном только Первоуральском новотрубном заводе в 1960–80 годах одновременно использовалось около 60-ти таких коэрцитиметров для контроля качества труб различного сортамента.

М.Н. Михеев имел государственный подход к решаемым вопросам. Так, относительно приборов контроля, он стремился изжить кустарщину. Разработанными в ИФМ приборами он стремился обеспечить все заинтересованные предприятия. Здесь требовались не десятки или сотни, а тысячи приборов. И Михеев



Первый дифференциальный магнитный прибор для контроля качества подшипниковых колец (1959 г.)



Дифференциальный магнитный структуроскоп ДМС-2



М.М. Беленкова

находил тех, кто мог это сделать. Он размещал заказы на изготовление крупных партий своих приборов в различных городах: в Москве, Кишиневе и т.д. Необходимо отметить, что всю ответственность за качество этих приборов Михаил Николаевич брал на себя. И сотрудникам лаборатории не раз приходилось «доделывать» сторонние коэрцитиметры.

Коэрцитиметры Института физики металлов имели много модификаций, например: КИФМ-1, КИФМ-3, КИФМ-10.1, КИФМ-20, ИК-1; для контроля твёрдых сплавов – КТС-1, КТС-3. Имея разный дизайн и элементную базу, они до сих пор создаются по принципам, сформулированным в работах Михеева и сотрудников лаборатории МСА.

Параллельно с коэрцитиметрией для решения задач неразрушающего контроля качества ферромагнитных сталей разрабатывались приборы, работающие на использовании других магнитных параметров: структуроскопы РК-2, РК-3, МС-2; дифференциальные структуроскопы ДМС-1, ДМС-3, ДИМХ-1, ДИМХ-2, КМС-1, МПК-1; структуроскопы для контроля поверхностного упрочнения КПУ-1, КПС-2М, ВСФ-1; многофункциональный структуроскоп МФМС-1 и магнитоизмерительный комплекс МИК-1. С помощью этих приборов, выпускаемых малыми сериями (выпущено более 1000 штук), решается достаточно широкий круг задач машиностроения.

Измерением магнитных, электрических свойств ферромагнитных сталей на протяжении многих лет занимались практически все сотрудники лаборатории МСА. Магнитные свойства определяли баллистическим и магнитометрическим методами, трудоёмкими, но обладающими малыми погрешностями. Накопленный экспериментальный материал представлен в монографиях М.Н. Михеева и Э.С. Горкунова [5], Г.В. Биды и А.П. Ничипурука [6], Г.В. Биды, Э.С. Горкунова, В.М. Шевнина [7]. Кроме того, лаборатория имеет электронную базу данных, где результаты представлены в виде графиков и таблиц.

Сравнительно небольшая группа М.М. Беленковой занималась исследованием магнитных свойств аустенитных сталей и сплавов, которые являются парамагнитными, β -титановых сплавов, природных гематитов и гетитов, т.е. материалами слабомагнитными. Парамагнитная восприимчивость χ и малая (порядка 1) магнитная проницаемость μ измерялись по методу Фарадея на магнитных весах с автокомпенсацией. Методами термомагнитного структурного анализа, включающего



Слева направо – Г.В. Биды, В.М. Морозова, М.Н. Михеев

в себя изучение температурной зависимости магнитной восприимчивости в магнитных полях, определение точек Кюри и мартенситных точек, исследовались особенности $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -превращений в материалах этого класса.

В зависимости от химического состава, температуры деформации и последующей термической обработки в структуре аустенитных сталей получается различное сочетание фаз: помимо карбидов и ϵ -фазы в ряде случаев возникает ферромагнитная α -фаза [8]. Обнаружение α -фазы имеет важное значение в связи с влиянием её на уровень магнитной проницаемости, поскольку аустенитные стали используются в качестве слабомагнитных материалов. Кроме того, α -фаза способствует разупрочнению стали при высоких температурах, повышает склонность к межкристаллитной коррозии и ухудшает некоторые технологические и эксплуатационные её свойства.

Исследования М.М. Беленковой способствовали созданию физических основ термомагнитного анализа слабомагнитных сталей и альфа-фазометрии. Использование в производственных условиях первых созданных в лаборатории ферритометров, работающих на феррозондовом и вихретоковом методах, представлено в работах [9, 10].

Б.М. Неизвестнов внёс большой вклад в создание материально-технической базы лаборатории магнитного структурного анализа. Являясь блестящим физиком экспериментатором, он обладал редкой способностью спланировать эксперимент и создать для его проведения установку буквально с нуля. Благодаря Борису Михайловичу в лаборатории появились магнитные весы (метод



Б.М. Неизвестнов

Фарадея). До настоящего времени работает уникальная установка, позволяющая измерять магнитоупругие эффекты в слабых магнитных полях при наложении на образцы упругих сжимающих и растягивающих деформаций, а также проводить измерения баллистическим и магнитометрическими способами магнитных свойства сталей под действием упругих напряжений. Как показывает библиография, Б.М. Неизвестнов принимал активное участие в работах по контролю термообработок стальных изделий и в создании коэрцитиметров [3,11].

Благодаря Б.М. Неизвестному был получен богатейший экспериментальный материал по магнитной устойчивости надводных и подводных кораблей к влиянию упругих напряжений. Тематика исследований носила закрытый характер, так как должна была обеспечить точную навигацию и скрытность военного флота. Работы касались изучения вопроса стабильности магнитной обстановки на борту кораблей и подводных лодок, а также вопроса создания материалов с заданными магнитными свойствами, устойчивыми при воздействии на конструкции из этих материалов магнитных полей и упруго-пластических деформаций.

В разное время в группе работали В.В. Нестеренко, Б.М. Ригмант, М.А. Веденев. В конце 1970-х годов М.Н. Михеев привлек к работе теоретика В.Г. Кулеева, который в дальнейшем возглавил это направление исследований.

Материал корпуса кораблей подвергается воздействию внешних магнитных полей (которые могут изменяться и по величине и направлению), статических



В.В. Нестеренко



Второй слева В.Г. Кулеев, далее – М.А. Веденев, М.Б. Ригмант

и динамических напряжений, величина которых может изменяться в широких пределах. Эти воздействия, в соответствии с природой ферромагнитных судостроительных сталей, могут привести к изменению магнитного состояния судов.

В работах академика С.В. Вонсовского показано, что магнитное поле и механические деформации по-разному воздействуют на магнитную текстуру ферромагнитных материалов. Если магнитное поле влияет на все типы доменных границ, то напряжения могут влиять только на 90-градусные ДГ. Исследование этого вопроса проводилось совместно со специалистами ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова. Было показано, что при совместном воздействии магнитных полей и упругих напряжений, намагниченность материала ферромагнитных сталей изменяется сложным образом. При этом происходят как необратимые, так и установившиеся при многократном воздействии напряжений обратимые изменения намагниченности. Разнообразный характер изменений намагниченности был получен на лабораторных установках ИФМ, и на натурных испытаниях в ЦНИИ им. А.Н. Крылова. Для объяснения характера поведения намагниченности материала корпусных сталей в нашем институте были разработаны теоретические модели, достаточные для инженерных расчётов. Эти модели учитывали величину и направление магнитного поля, а также величину и вид напряжений (растяжения, сжатия, кручения и изгиба).

Используя модельный подход к определению магнитной обстановки на борту корабля, можно активно влиять на сам процесс формирования этой обстановки. Необходимость снижения магнитного поля на борту корабля объясняется требованиями навигационного характера, а так же связано с возможностью раннего обнаружения и, следовательно, уничтожения корабля.

Михаил Николаевич Михеев покинул пост директора Института физики металлов и заведующего лабораторией магнитного структурного анализа в 1986 г. Его научная и организаторская деятельность отмечена многими государственными наградами, в том числе орденами:

- «Знаком Почёта» дважды – в 1945 и 1954 гг.;
- «Орденом Октябрьской революции» в 1971 г.;
- «Орденом Трудового Красного Знамени» в 1975 г.;
- «Орденом Ленина» в 1983 г..

С 1987 по 2001 гг. лабораторию возглавлял Э.С. Горкунов. Эдуард Степанович стал сотрудником лаборатории МСА в 1971 г. В 1974 г. он защитил кандидатскую диссертацию. По инициативе М.Н. Михеева в Ижевске в 1977 г. создаётся Ижевский Отдел Института физики металлов (позднее Физико-технический институт УрО РАН). Туда из ИФМ, как в свое время из ЛФТИ в Свердловск, переехала большая группа молодых учёных. Михеев оказывает большую помощь новому институту в создании научно-экспериментальной базы, лично подбирает кадры. Горкунов



Э.С. Горкунов

уехал в Ижевск научным сотрудником, но очень скоро организовал там свою лабораторию неразрушающего магнитного контроля, тематика которой была близка лаборатории МСА. Эдуард Степанович всегда активно взаимодействовал в научном и организаторском плане с Михеевым, был его учеником. Позднее в Физико-техническом институте Э.С. Горкунов становится заместителем директора.

М.Н. Михеев высоко оценивал научные и организаторские способности Э.С. Горкунова, вероятно, именно поэтому он передаёт свою лабораторию в его руки.

Под руководством Э.С. Горкунова в лаборатории МСА дополнительно к её традиционным направлениям проводятся исследования возможности использования магнитных характеристик, измеренных на частных циклах магнитного гистерезиса, а также исследования устойчивости магнитных состояний к воздействию электромагнитных полей, упругих деформаций и температуры с целью создания новых методов и приборов неразрушающего контроля термической обработки. В начале 90-х годов номенклатура приборов неразрушающего контроля, изготавливаемых в лаборатории, составляла 16 наименований.

В 1989 г. Э.С. Горкунов защищает докторскую диссертацию. В 1997 г. он становится лауреатом Государственной премии РФ. Кроме того, он исполняет обязанности заместителя председателя научного совета РАН по проблеме «Неразрушающие физические методы контроля», является заместителем главного редактора журнала «Дефектоскопия» и заместителем директора ИФМ.

«Лихие 90-е» заметно сказались на судьбе лаборатории МСА. Приватизация, развал промышленных предприятий, ликвидация или значительное сокращение числа работников центральных заводских лабораторий, которые всегда были важным связующим звеном между ИФМ и предприятием. Всё это приводит к резкому сокращению объёма хоздоговорных работ, падает потребность в приборах и методиках неразрушающего контроля. Как известно, в это же время наносится значительный урон военно-морскому флоту – сокращается строительство крупных судов и подводных лодок. Многолетнее успешное сотрудничество лаборатории с Северодвинском и ЦНИИ им. А.Н. Крылова практически прекращается.

Но нет худа без добра. Сотрудники сосредоточивают своё внимание на лабораторных исследованиях и оформлении ранее полученных результатов. В период за 1990–1995 гг. в лаборато-



Г.В. Бида, М.Б. Ригмант, А.П. Ничипурук

рии МСА защищена одна докторская (Г.В. Бида) и четыре кандидатских диссертации. М.Б. Ригмант начинает заниматься разработкой высокочувствительной магнитометрической аппаратуры для оценки количества ферромагнитной фазы в неферромагнитной основе. Все основные научные направления в работе лаборатории продолжают развиваться.

В 2000 г. Э.С. Горкунов становится директором Института машиноведения УрО РАН

С 2001 г. лабораторию магнитного структурного анализа возглавляет А.П. Ничипурук. Он пришёл в ИФМ в 1979 г. после окончания Уральского государственного университета. Защитил кандидатскую диссертацию в 1990 г., в 2008 г. – докторскую диссертацию «Модель магнитного гистерезиса и её применение в магнитной структуроскопии конструкционных сталей» и становится доктором технических наук. Александр Петрович является членом редакционной коллегии журнала «Дефектоскопия».

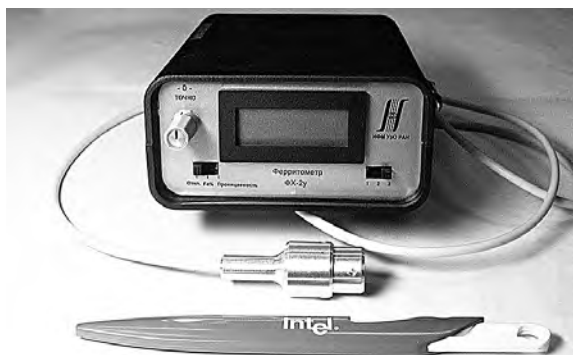
В лаборатории продолжают разрабатываться новые методы контроля и создаются приборы для их реализации: магнитный структуроскоп МС-401 (совместно с ООО «Микроакустика»), коэрцитиметр КИФМ-1Х, ферритометр ФХ-3 для оценки количества



А.П. Ничипурук



ИМПАС-1 – прибор для определения магнитной проницаемости парамагнитных сплавов и сталей



Ферритометр ФХ-2у

ферромагнитной фазы в аустенитных сталях, измеритель магнитной проницаемости аустенитных сталей ИМПАС-1, измеритель индукции постоянных, переменных и импульсных магнитных полей ТХ-4, индукционный дефектоскоп ДПС-7 для контроля качества пайки соединений статоров электрических машин.

В настоящее время магнитные свойства сталей измеряются на измерительном комплексе REMAGRAPH C-500 (HYSTERESISGRAPH). Эта компьютеризированная установка позволяет оперативно получить всю информацию с кривой намагничивания и петли магнитного гистерезиса.

Лаборатория МСА всегда работала на стыке двух научных направлений: физики магнитных явлений и физического металловедения, однако базовым образованием научных сотрудников обычно была физика магнитных явлений. С 2015 г. в коллективе лаборатории успешно трудится квалифицированный металлург, доктор физико-математических наук Н.В. Казанцева.

В разное время (во многом в зависимости от внешних обстоятельств) менялся приоритет между основными научными направлениями, проводимыми в лаборатории. Сейчас наибольший интерес представляет проблема оценки степени пластической деформации и уровня внутренних механических напряжений в конструкциях из низкоуглеродистых и слаболегированных сталей.

Магнитные свойства, измеряемые на кривой намагничивания или петле гистерезиса, имеют недостаточную чувствительность или неоднозначное поведение в зависимости от приложенных или остаточных напряжений, особенно при больших растягивающих деформациях перед моментом разрушения материала. Одной из причин этого является то, что механические напряжения влияют в основном на движение 90-градусных доменных стенок, а вклад в изменение большинства классических магнитных свойств одновременно вносит движение 90- и 180-градусных границ. Перспективы селективного контроля упругих деформаций (напряжений) лежат в области изучения перераспределения обратимых и необратимых процессов перемагничивания и разделение вкладов в них 90- и 180-градусных доменных границ. Особенный интерес

представляет экспериментальное определение критических полей смещения 90-градусных доменных границ и исследование наведенной магнитной анизотропии в деформированной стали.

Под руководством А.П. Ничипурука в лаборатории ведутся как теоретические [12,13], так и экспериментальные исследования [14–16], целью которых является разработка методики неразрушающего контроля механических сжимающих напряжений в низкоуглеродистых сталях без предварительного установления корреляционных связей между магнитными параметрами и механическими напряжениями, т.е. без предварительной калибровки.

Наиболее значительные результаты, полученные в лаборатории МСА:

- разработаны физические принципы магнитных и электромагнитных методов неразрушающего контроля механических свойств проката, термической (отжиг, нормализация, закалка, отпуск, старение) и химико-термической обработок, качества поверхностного упрочнения стальных и чугунных изделий;
- заложены теоретические и экспериментальные основы использования приставных преобразователей магнитных структуроскопов, позволяющих проводить контроль качества изделий различных размеров и форм, а также физико-механических свойств на заданной глубине от их поверхности;
- накоплен и теоретически обобщён большой экспериментальный материал по влиянию магнитного поля и упругих деформаций различного вида на магнитное состояние ферро-



2012 г. слева направо:
1 ряд: Сажина Е.Ю., Царькова Т.П., Фролова С.С., Сомова В.М., Козлова Т.Л.
2 ряд: Кулеев В.Г., Пономарев В.С., Коробицын В.Г., Ничипурук А.П., Коган Л.Х., Ригмант М.Б.
3 ряд: Сташков А.Н., Сурин Д.Г., Худяков Б.А., Михеев А.М., Корх М.К.

магнитных материалов, позволяющий управлять «магнитной обстановкой» на конструкциях из этих материалов;

- созданы методы контроля структуры, физико-механических свойств и толщины поверхностных слоёв изделий, упрочнённых различными методами (закалка ТВЧ, химико-термическая обработка, упрочнение концентрированными потоками энергии, виброупрочнение), а также обезуглероживания в стали и отбела в чугуне;
- разработаны методы оценки фазового состава, пористости, выявления парамагнитных и ферромагнитных участков с различающимися физическими свойствами в литых металлокерамических изделиях и сварных соединениях;
- предложены методы оценки напряжённого состояния в материалах и конструкциях после термической обработки и пластической деформации, а также в процессе эксплуатации.

А.П. Ничипурук

Список литературы

1. М.Н. Михеев, Зав. лаб., № 10, 1155 (1938).
2. М.Н. Михеев, ФММ **5**, 44 (1957).
3. М.Н. Михеев, Б.М. Неизвестнов, В.М. Морозова, Г.В. Сурин, Дефектоскопия, № 2, 131 (1969).
4. М.Н. Михеев, В.М. Морозова, Г.В. Сурин, В.П. Табачник, Л.А. Фридман, Дефектоскопия, № 5, 85 (1970).
5. М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов, *Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля*, Наука, Москва (1993), 219 с.
6. Г.В. Бида, А.П. Ничипурук, *Магнитные свойства термообработанных сталей*, Екатеринбург: УрО РАН (2005), 218 с.
7. Г.В. Бида, Э.С. Горкунов, В.М. Шевнин, *Магнитный контроль механических свойств проката*, Екатеринбург: УрО РАН (2002), 252 с.
8. М.Н. Михеев, М.М. Беленкова, Г.А. Пегушина, Р.Н. Виткалова, В.А. Теплов, ФММ **62**, 1208 (1986).
9. М.М. Беленкова, М.Н. Михеев, Н.Н. Зацепин, Р.Н. Виткалова, П.А. Устюгов, Дефектоскопия, № 3, 68 (1978).
10. М.М. Беленкова, Л.Х. Коган, М.Н. Михеев, Дефектоскопия, № 6, 177 (1969).
11. М.Н. Михеев, Б.М. Неизвестнов, В.М. Францевич, Г.В. Сурин, Дефектоскопия, № 2, 89 (1965).
12. А.П. Ничипурук, Е.В. Розенфельд, ФММ **84**, 72 (1997).
13. В.Г. Кулеев, Дефектоскопия, № 7, 12 (2011).
14. А.П. Ничипурук, Е.В. Розенфельд, М.С. Огнева, А.Н. Сташков, А.В. Королёв, Дефектоскопия, № 10, 18 (2014).
15. А.П. Ничипурук, А.Н. Сташков, М.С. Огнева, А.В. Королёв, А.А. Осипов, Дефектоскопия, № 10, 19 (2015).
16. В.Г. Кулеев, Т.П. Царькова, М.С. Огнева, А.П. Ничипурук, А.Н. Сташков, Дефектоскопия, № 12, 53 (2013).

ЛАБОРАТОРИЯ

термомагнитной обработки

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Пудов Владимир Иванович, заведующий лабораторией, к.ф.-м.н.
- Агалаков Валерий Петрович, ведущий инженер
- Белехова Ирина Михайловна, старший технолог
- Белькова Татьяна Даниловна, старший инженер
- Бутакова Лиана Анатольевна, старший инженер
- Волков Александр Викторович, младший научный сотрудник
- Вотинцев Виктор Михайлович, старший лаборант
- Дорошек Александр Станиславович, ведущий электроник
- Комоликов Юрий Иванович, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Миронюк Николай Ефимович, главный специалист, к.т.н.
- Реутов Юрий Яковлевич, ведущий научный сотрудник, д.т.н.
- Саматов Михаил Викторович, главный специалист

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ терромагнитной обработки

Лаборатория терромагнитной обработки ИФМ УрО РАН была создана в марте 2007 г. на базе лаборатории электромагнетизма, основанной в 1932 г. В разное время старейшим подразделением руководили: профессор Яков Григорьевич Дорфман; профессор Рудольф Иванович Янус – лауреат Сталинской премии 1951 г.; д.т.н. Павел Акимович Халилеев – лауреат Сталинской премии 1946 г., Ленинской премии 1964 г. и д.т.н. Геннадий Семенович Корзунин – заслуженный деятель науки РФ.

Основные научные направления деятельности лаборатории:

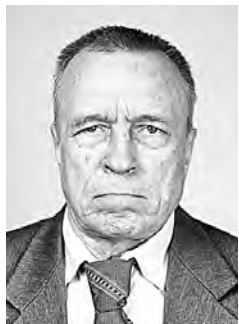
- развитие феррозондового, вихретокового и других индукционных методов, применительно к высокоточным измерительным и диагностическим системам;
- изучение неоднородных магнитных полей переизлучения при изменении электрофизических параметров ферромагнитных и неферромагнитных объектов;
- исследование физических основ и механизмов влияния терромагнитной обработки (ТМО), в том числе с применением аморфного углеродного покрытия на структуру и физико-механические свойства поликристаллических магнитомягких сплавов и изделий из легированных сталей;
- теоретическая и прикладная метрология.

Изучение работы феррозондовых магнитомодуляционных преобразователей на Урале связано с работами П.А. Халилеева (в 1938 г. он разработал локальный коэрцитиметр, позднее внедренный в производство М.Н. Михеевым [1, 2]), а затем оно было продолжено трудами Р.И. Януса, В.И. Дрожжиной, М.А. Веденёва и Л.А. Фридмана [3–6]. Работы по практическому применению преобразователей в измерительных приборах и устройствах, в том числе и для медицинских целей, велись М.А. Веденёвым,



В.И. Пудов

В.И. Дрожжиной, Ю.Я. Реутовым, а с 90-х годов – В.И. Пудовым. В результате проведённых исследований удалось уменьшить размеры преобразователей с сотен миллиметров до единиц миллиметров при сохранении (и даже улучшении) их основных рабочих характеристик. Работами М.А. Веденёва, В.И. Дрожжиной и Л.А. Фридмана была доказана возможность повышения частоты возбуждения феррозондовых преобразователей с сотен герц до сотен килогерц, что позволило миниатюризовать не только сами преобразователи, но и электронную аппаратуру, обеспечивающую их функционирование. Изучением работы градиентометрических преобразователей и возможности измерения градиентов магнитного поля высоких порядков занимались Ю.Я. Реутов, В.И. Пудов и А.А. Литвиненко [7]. Позднее В.И. Пудовым были предложены методы повышения помехоустойчивости феррозондовых магнитомодуляционных преобразователей [8–18].



Ю.Я. Реутов

Результаты выполненных исследований позволили разработать и внедрить в практику целый ряд магнитометров, позволяющих измерять поля индукцией от 10^{-10} до 0,1 Тл, а также градиенты этих полей. Разработанные приборы применялись и применяются для определения степени намагниченности ответственных промышленных изделий, для измерения коэффициентов экранирования магнитных экранов [19], как образцовые при метрологической аттестации магнитоизмерительных приборов, в медицине, для обнаружения огнестрельного оружия, скрытого на теле человека под одеждой.



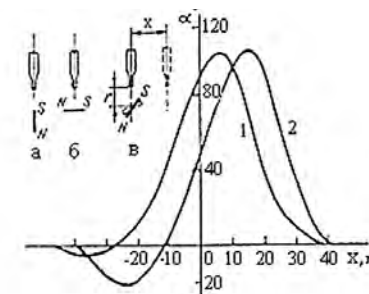
И.М. Белехова

В области разработки феррозондовой и вихретоковой аппаратуры для селективной интраоперационной диагностики и удаления из живых тканей и органов человека инородных металлических тел лаборатория занимает ведущее положение в РФ.

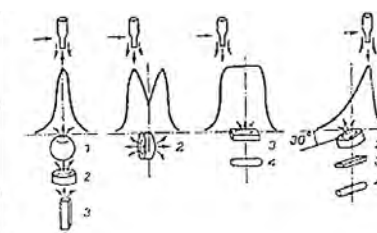


Ю.И. Комолов

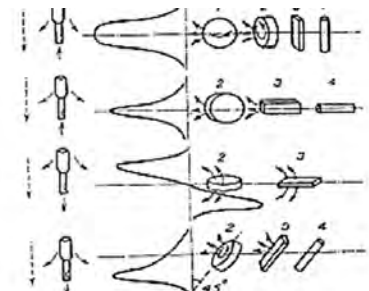
В.И. Пудовым и Ю.Я. Реутовым проведён большой объём исследований физических особенностей диагностики в живых тканях различных по геометрической форме, магнитной проницаемости, электропроводности инородных ферромагнитных, неферромагнитных и комбинированных тел. Разработаны и запатентованы для различных видов операций общей и глазной хирургии модели высокочувствительной феррозондовой и вихретоковой аппаратуры (ПФ-01, ПФ-02, ПФ-03 и ЛИМТ-1, ЛИМТ-2, ЛИМТ-3) и специальные конструкции одно- двух- трёх-компонентных датчиков, воспринимающие нормальную или тангенциальную компоненты поля рассеяния инородного тела [20–31]. Разработаны вспомогательные медицинские средства и способы селективной диагностики инородных металлических тел, например, при их пограничном внедрении вблизи важных органов, сосудов и нервных окончаний, при малоинвазивных и лапароскопических операциях [31–38].



Феррозондовый полюсоискатель. Зависимость показаний прибора от ориентации датчика (а, б) к инородному ферромагнитному телу при горизонтальном перемещении датчика: 1 – под углом 30°; 2 – под углом 60°; r=20 мм



Вихретоковый локатор инородных металлических тел ЛИМТ-2. Зависимость выходного сигнала датчика от формы инородных неферромагнитных тел: 1 – шар; 2 – диск; 3 – пластина; 4 – стержень



Вихретоковый локатор инородных металлических тел ЛИМТ-2Э. Зависимость выходного сигнала датчика от формы инородных неферромагнитных тел: 1 – шар; 2 – диск; 3 – пластина; 4 – стержень

Уже на стадии предоперационной диагностики феррозондовый полюсоискатель обнаруживает при разной ориентации датчика мелкие ферромагнитные частицы размером 1,4x0,7 мм на расстоянии 13–16 мм, а обломок швейной иглы 10x0,8 мм – на расстоянии 70–85 мм или унифицированную пулю (5,6 или 7,62 мм) – на расстоянии 95–115 мм.

Для повышения остаточной намагниченности инородных тел и их удаления предложен разработанный нами и сотрудниками кафедры глазных болезней УГМУ двухполюсной магнит-концентратор на основе ниодим-железо-бор. Магнит-концентратор ос-

нащён также набором специальных наконечников для удаления инородных тел из полости глаза, тканей и органов человека.

Вихретоковый локатор инородных тел обнаруживает ферромагнитную частицу размером $1,0 \times 0,3$ мм на расстоянии 8–10 мм, обломок швейной иглы $10 \times 0,8$ мм – на расстоянии 41 мм, а алюминиевую частицу $3,0 \times 3,0 \times 0,3$ мм – на расстоянии 6–10 мм, свинцовую пулю 5,6 – на расстоянии 30 мм или унифицированную пулю (5,6 или 7,62 мм) – на расстоянии 50–70 мм. Датчик локатора воспринимает нормальную компоненту поля рассеяния инородного тела. Его рабочий диаметр 4 мм.

Модели ЛИМТ превосходят по своим рабочим параметрам (чувствительности, малым диаметром датчика) известные аналоги иностранной вихретоковой аппаратуры, например, локатор «Roper-Holl» английской фирмы Keeller.

Датчик локатора воспринимает тангенциальную компоненту поля рассеяния инородного тела в радиусе 3–6 см. Он обнаруживает сразу ферромагнитные и неферромагнитные частицы. При переходе уже в режим определения конкретного вида металла (сталь или медь, свинец) обнаруживает и комбинированные металлические частицы (т.е. ферромагнитные частицы, покрытые цветным металлом), у которых при локализации ферромагнитный момент компенсируется вихретоковым от цветного металла).

Таким образом, полученные лабораторией результаты в области феррозондовой и вихретоковой интраоперационной диагностики инородных металлических тел в органах человека формируют новые условия и возможности в практике оперативной хирургии.

Изучены функциональные возможности однонаправленного вихретокового преобразователя при локализации арматуры железобетонных изделий и измерении её геометрических параметров. Показано, что данную конструкцию преобразователя затруднительно применить для контроля железобетонных изделий со сложнопрофильными каркасами и с содержанием арматуры более 2 %. Предложена конструкция накладного вихретокового преобразователя, позволяющая более эффективно решить данную проблему. В частности, достаточно локально оценивать состояние арматуры железобетонных конструкций, отстраиваться от влияния переизлучённых магнитных полей, расположенных вблизи арматуры и других факторов, и, в то же время, достаточно оперативно перепроверить полученные результаты исследования [39].

Разработан комплект приёмо-передающей аппаратуры для отслеживания продвижения внутритрубного снаряда в магистральном трубопроводе. Внутритрубный дефектоскоп в процессе продвижения по магистральному трубопроводу может застрять в любом его месте, закупоривая трубопровод и создавая тем самым аварийную ситуацию. Данная аппаратура позволяет обнаруживать дефекты типа щели с бездефектной стороны через

стальную стенку толщиной 10–15 мм, а также отслеживать перемещение дефектоскопа по сигналу маркера, установленному в дефектоскопе, через стенку стальной трубы с расстояния более 15 м [40]. Комплект испытан в НПО «Спектр».

Разработана новая комплексная аппаратура, позволяющая определять расстояние до намагниченных объектов с неизвестными физическими характеристиками и оперативно проводить их пространственную локализацию. Разработанные алгоритм и программа обработки позволяют выводить результаты измерений в реальном времени и визуализировать расстояние до искомого объекта с указанием расположения его магнитных полюсов относительно системы датчиков. Погрешность результатов составляет не более 15 %. Область применения – поисковая техника, научные исследования, диагностика железобетонных конструкций, оперативная хирургия [41].

Разработка способов контроля стальных канатов является актуальной задачей в практике неразрушающего контроля (НК). Стальные канаты изготавливаются из сталей разных марок 6X19, 6X30, 18X19, имеющих разброс μ_a в интервале 30–60 ед. СИ. В процессе эксплуатации они подвергаются многократным и интенсивным динамическим нагрузкам, приводящим к их износу, установленная норма которого не должна превышать 24 % от первоначальной площади поперечного сечения канатов.

Наиболее экономичный и эффективный способ контроля стальных канатов связан с применением магнитоизмерительных дефектоскопов. Для настройки и проверки применяют сертифицированные средства измерений, в том числе ферромагнитные образцы – имитаторы, категории Государственных стандартных образцов (СО), выполняющих функцию средств измерений износа стальных канатов.

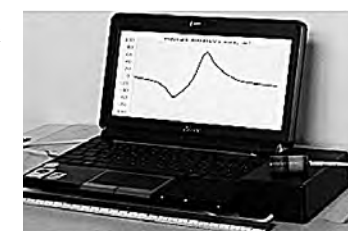
Сотрудниками лаборатории разработаны стандартные ферромагнитные образцы, оптимизирующие настройку дефектоскопов, что позволяет уменьшить зависимость контроля износа канатов от условий их эксплуатации и марок сталей, использованных при их изготовлении [42–45].

Физическая основа для создания СО связана с оптимизацией параметров амплитудной магнитной проницаемости (μ_a) материала образцов, отражающей работу системы «стальной канат – дефектоскоп» в условиях эксплуатации.

В качестве материала образцов выбрана высокоуглеродистая инструментальная сталь У8, из которой были изготовлены изделия в виде прутков диаметром 1 и 5 мм и длиной ~1200 мм.



Аппаратура для контроля перемещения внутритрубных дефектоскопов



Магнитный дальномер



Стандартные образцы, соответствующие 0, 10, 15, 20 и 25% износу канатов

Данные размеры прутков, превысили размеры датчиков дефектоскопа в 3–4 раза, что практически исключило влияние краевого эффекта. Прутки были подвергнуты термообработке по специальному режиму, обеспечившему получение материала с амплитудной магнитной проницаемостью (μ_0) в узком интервале 19–21 ед. СИ, то есть существенно меньшей, чем у эксплуатируемых стальных канатов. Этот критерий отбора по μ_0 является важным условием эффективности применения СО. Поэтому для его выполнения производили отбор прутков, комбинировали диаметры прутков и формировали пучки для СО, имитирующие разный процент износа круглых и плоских стальных и резиноканатов стальных канатов. Для всех типов канатов были изготовлены комплекты универсальных СО с имитацией 0, 10, 15, 20 и 25 % износа при абсолютной погрешности не более 0,3 %.

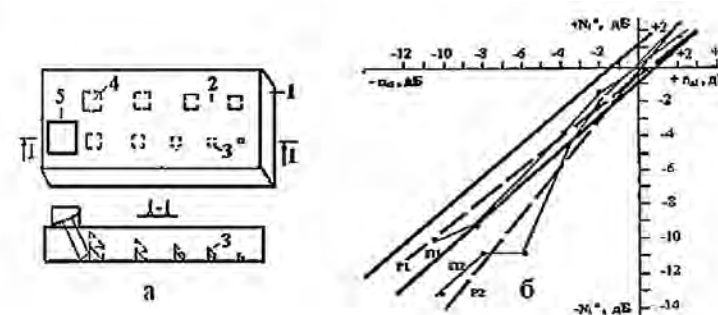
Таким образом, разработанные ферромагнитные образцы с постоянной величиной магнитной проницаемости ($\mu_0 \approx 20$ ед. СИ), имитирующие разную степень износа канатов, позволяют эффективно проверять настроечные параметры дефектоскопов УДК-3 и успешно их оптимизировать, что повышает возможности магнитного метода дефектоскопии при контроле стальных канатов.

Ультразвуковая диагностика занимает одно из ведущих положений в НК. Для её развития разработаны различные виды настроечных образцов. Однако они не предназначены для настройки широкого класса ультразвуковой аппаратуры, что приводит к снижению её функциональных возможностей, достоверности и точности результатов диагностики.

Решение этих проблем связано с разработкой универсальных настроечных устройств, позволяющих в производственных условиях выявлять и корректировать рабочие параметры основного элемента аппаратуры – преобразователя с электронно-акустическим трактом.

В [46–50] предложено решение в виде плоских матричных устройств с линейной зависимостью $n_i = 20 \cdot \lg(S_i/S_0)$, представленной отношениями площадей S_i отражателей к опорной S_0 . Матричные устройства формируют также логарифмическую зависимость отношений акустических эхо сигналов N_i от логарифма отношений площадей отражателей n_i . Параметры смоделированных дефектов привязаны к размерам реальных дефектов.

Образцы изготовляют из стали Ст20 в виде пластин, в которых созданы пуансонами плоские угловые отражатели в виде квадратных или прямоугольных форм с диапазоном изменения n_i от +6 до –20 дБ и с шагом 0,5, 1, 1,5 и 2 дБ. Причем любой из отражателей с S_i может быть опорным S_0 , тогда $n_i = 0$. Отражатели формируют эхо-сигналы с теми же величинами шагов в диапазоне N_i от +6 до –20 дБ. После сканирования матрицы наклонным пре-



Фронтальный и продольный виды матричного образца (а). 1 – матрица; 2 – рабочая поверхность матрицы; 3 – опорный отражатель; 4 – плоские угловые отражатели; 5 – наклонный ультразвуковой преобразователь. Аттестационный график (матрица выполнена с шагом 2дБ) (б). P1, P2 – линии зависимости соответственно для преобразователей П1 и П2

образователем строится градуировочная характеристика $N_i = f(n_i)$. Параметрами корреляционной зависимости являются коэффициенты a и b в уравнении связи вида $N_i = a + b n_i$; где a – характеризует отклонение от нуля по оси N_i при $n_i = 0$ линии, построенной методом наименьших квадратов для экспериментальной зависимости $N_i = f(n_i)$; b – определяет относительно оси n_i угол наклона этой линии, расположенной под углом приблизительно к 45° в пределах поля допуска или вне его. Например, при $n_i = -6$ дБ значение N_i составляет –10 дБ, то есть отклонение достигает 4 дБ вместо допустимых 2 дБ. Применение для контроля этого дефектоскопа в комплекте с преобразователем П2 может привести к ошибке второго рода, то есть браку годных изделий.

Таким образом, предложенный способ настройки ультразвуковых дефектоскопов позволяет повысить эффективность их работы и, как следствие, достоверность и точность результатов диагностики за счёт нового подхода в настройке и проверки параметров линейности электроакустического тракта аппаратуры. Одновременно за счёт упорядочения в настройке широкого класса ультразвуковой аппаратуры обеспечивается единообразие методики её поверки и существенное расширение областей для её практического использования, а также диапазон номенклатуры контролируемых материалов и изделий.

Стандартные образцы являются одним из основных средств метрологического обеспечения неразрушающего контроля. При разработке СО необходимо с учётом особенностей метода контроля решить комплекс вопросов, связанных с установлением типа СО, выбором материала и исследованием его физических свойств, а также с разработкой методики изготовления и метрологической аттестацией СО. Эти вопросы рассмотрены применительно к вихретоковым устройствам, используемым для контроля в производственных условиях гранулированного фенопласта

на допустимое содержание электропроводящей магнитной компоненты (ЭМК). Объектом контроля являются отбираемые и помещаемые в пластмассовый контейнер образцы фенопласта. Недопустимое содержание ЭМК в фенопласте контролировалось по индикаторному сигналу при нормированном коэффициенте усиления K_u в условиях прохождения образцов через датчик устройства.

В процессе исследований было установлено, что основной магнитной составляющей ЭМК являются соединения типа природного магнетита (СМ), которые в виде гранул можно извлечь из фенопласта посредством постоянного магнита ($B = 0,4$ Тл). Магнитная восприимчивость извлеченного СМ составила $\sim 10^{-2}$ ед.Си. В состав фенопласта входит также каолин с магнитной восприимчивостью на уровне $\sim 10^{-5}$ ед. Си. На основе этих данных была разработана методика изготовления образцов в виде механической смеси СМ и каолина в различных пропорциях. Методом взвешивания был изготовлен материал образцов, который в количестве 4 г помещался в отдельный пластмассовый контейнер. Аттестация СО этого состава осуществлена по процедуре их приготовления. В результате был создан комплект из 10 образцов (табл. 1) [51].

Таблица 1. Комплект стандартных образцов при значениях $\delta = D_B \cdot 100\%$ и K_u

№ СО	№0-1	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9
M_k , г	1,79	2,21	2,44	2,77	3,05	3,32	3,475	3,634	3,769	4,03
M_B , г	2,20	1,80	1,55	1,28	0,97	0,71	0,511	0,368	0,211	0
δ , %	55	45	39	31	24	18	13	9,3	5,2	0
K_u	0,8	1,5	2,9	3,5	4,8	5,5	6,5	7,2	8,2	9,0

Аттестованные значения СО в виде относительного содержания D_B (в массовых долях СМ) в механической смеси СМ и каолина определяли по формуле

$$D_B \cong \left(\frac{M_B}{M_B + M_K} \right),$$

где M_B , M_K – масса магнитного вещества (СМ) и каолина соответственно.

Апробация комплекта СО с оценкой его временной стабильности была проведена в течение 2003–2008 гг. на промышленном предприятии с последующим внедрением в технологию входного контроля сырья.

Влиянию терромагнитной обработки (ТМО) на поликристаллические ферромагнитные материалы посвящено немало публикаций. Однако из анализа работ, связанных с ТМО легированных сталей, следуют противоречивые результаты. В лаборатории исследованы изделия из конструкционных и быстрорежущих ста-

лей – стальные шпильки М16 из стали 40Х, метчики М8 и концевые фрезы диаметром 38 мм из стали Р6М5К5, метчики М5 из стали Р6М5, которые прошли полный цикл стандартной ТО и отпуск. Терромагнитная обработка изделий проводилась в постоянном магнитном поле $H \approx 65-70$ кА/м [52–56]. Установлено, что при воздействии ТМО формируется в многофазных сплавах более совершенная структура, изменяющая их физико-механические свойства. Эффект от ТМО проявляется в узком диапазоне температур при оптимальном времени выдержки и определённой напряжённости воздействующего магнитного поля. Он также зависит от размеров и конфигурации обрабатываемых материалов и изделий. При найденных оптимальных режимах обработки изделий, например: из стали Р6М5К5, повышена их износостойкость 2–3 раза при сохранении твердости, из стали Р6М5 – в 2 раза, из стали 40Х повышена ударная вязкость в 3 раза (относительно принятой нормы по ТУ).

Общее количество обработанных метчиков М8 из стали марки Р6М5, подвергнутых эксплуатационным испытаниям, составило ~ 50 штук, в том числе обработанных по оптимальному режиму – ~ 25 штук. Эксплуатационная износостойкость контрольных образцов, соответствующая установленной норме ГОСТ, определяемой количеством обработанных в одном режиме деталей (3000 шт), принималась за единицу. Результаты представлены в табл.2.

Таблица 2. Зависимость относительной износостойкости от режима обработки в постоянном магнитном поле $H \approx 65$ кА/м метчиков М5, сталь марки Р6М5

Температура выдержки t_B , °С	Время выдержки t_B ,				
	0,2 ч.	0,5 ч.	1 ч.	2 ч.	4 ч.
500	1,2	1,4	1,5	1,3	1,1
560*	1,4	1,5	1,7*	1,4	1,1
600	1,2	1,4	1,3	1,2	0,8
700	1,1	1,2	0,8	–	–
560**	–	1,1	–	–	–

* – оптимальный режим; ** – контрольный эксперимент в отсутствие воздействующего магнитного поля.

Приведённые в табл. 2 результаты подтверждены актами производственных испытаний. Дальнейшее увеличение количества обрабатываемых метчиков, взятых из разных партий и подвергнутых ТМО по вышеуказанному режиму, показало, что результаты при их эксплуатационных испытаниях могут изменяться в пределах $\pm 10\%$.

Изменения физико-механических свойств изделий, например, из инструментальной стали, происходят в условиях восходящей диффузии, приводящей к перераспределению углерода, дисло-

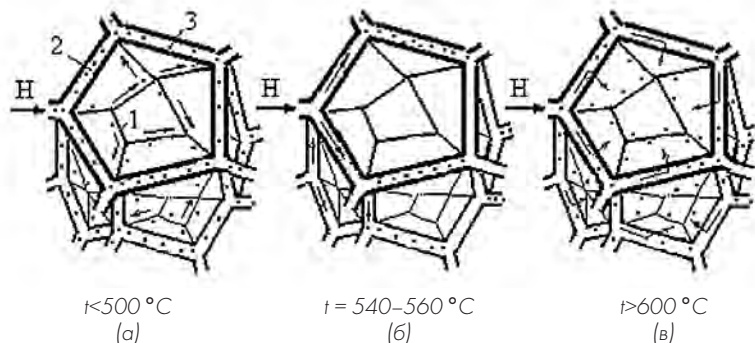


Схема распределения примеси фосфора по зерну легированной стали: а – при ТМО в условиях диффузии по границам субзёрен; б – по приграничному слою; в – в условиях перехода пограничной диффузии в объёмную; 1 – граница субзерна; 2 – приграничный слой зерна; 3 – фосфор

каций, карбидов и примеси. В частности, примеси, формирующие отпускную хрупкость (фосфор, сера и другие), концентрируются по приграничным слоям зёрен, параллельным оси образца, вдоль которой приложено магнитное поле. В результате происходит очищение от примесей приграничных слоёв зёрен и субзёрен в плоскостях, ортогональных оси образцов, что приводит к повышению сопротивления материала поперечным сдвиговым деформациям [52, 53].

Полученные результаты формируют новые условия и возможности получения изделий с избирательным изменением их свойств. В то же время, данный эффект позволяет создать новое весьма перспективное направление, связанное с комбинированной обработкой материалов и изделий [57], осуществляемой, например, путём предварительного напыления на поверхность изделия алмазоподобного покрытия и последующего воздействия ТМО [58]. На примере обработки изделий из стали Р6М5К5 получено повышение их износостойкости в 9–10 раз. Комбинированная обработка изделий существенно снижает трудозатраты по сравнению, например, с их цементированием, но самое главное, она позволяет управлять процессом приповерхностного и объёмного упрочнения изделий и избирательно обрабатывать отдельные участки поверхности.

Рассмотрены перспективы улучшения электромагнитных свойств ленточных магнитопроводов, предназначенных для трансформаторов тока, путём их термомагнитного модифицирования для формирования структуры доменов с поперечной ориентацией намагниченности [59–61].



Концевая фреза диаметром 38 мм из стали Р6М5К5

В качестве исследуемых изделий использовали тороидальные магнитопроводы с различной толщиной (δ)

лент. Образцы были изготовлены из пермалловых сплавов 79НМ (температура Кюри $\Theta=430$ °С, $\delta=0,01$ мм, средний диаметр магнитопровода $d_{cp}=30$ мм), 50 НП ($\Theta=500$ °С, $\delta=0,05$ мм, $d_{cp}=30$ мм) и аморфного сплава типа ГМ 501 ($\Theta=160$ °С, $\delta=0,02$ мм, $d_{cp}=26$ мм).

Изделия обрабатывались на термомагнитной установке при напряжённости магнитного поля $H = 30-100$ кА/м, время выдержки при ТМО 5–30 мин и температуры от 100 до 200 °С.

Снятие петель гистерезиса и обработку опытных данных производили на установке УВТ-82-А-93, занесённой в Госреестр РФ, при частоте $f = 50$ кГц и амплитудах магнитной индукции $B_m = 0,2; 0,1; 0,05; 0,02; 0,01$ Тл. Погрешность определения магнитных характеристик не превышала 5 %.

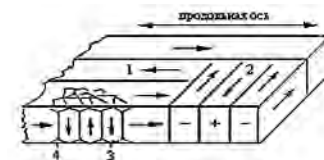
В результате установлены параметры эффективных режимов ТМО в узком диапазоне t° , времени выдержки ($t_{в}$) и определённой величине магнитного поля (H). В зависимости от типа обрабатываемых материалов и подобранных режимов ТМО достигнуто улучшение магнитных характеристик, например, увеличение в 1,4–1,6 раза амплитудной магнитной проницаемости, уменьшение H_c в 1,4–2 раза и снижение $R_{уд}$ 1,2–1,9 раза относительно исходного состояния изделий.

Установлено, что применение оптимальных режимов термомагнитного воздействия обеспечивает существенное улучшение физических свойств исследованных магнитопроводов при разных амплитудах магнитной индукции. Это обстоятельство необходимо учитывать в зависимости от области применения данных магнитопроводов: электроизмерительные трансформаторы, дроссели различного назначения, реле, магнитные экраны и другие устройства.

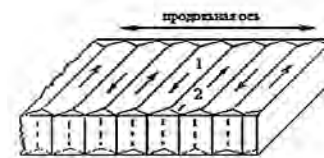
Физическая сущность ТМО заключается в следующем. Например, при изготовлении аморфной ленты путём быстрого охлаждения расплава [62] и последующей первичной термической обработки смотанной ленты в магнитопроводе, её структура формируется из основных продольных (1), поперечных (2), перпендикулярных (3) 180° и замыкающих магнитный поток краевых (4) 90° доменов.

При вторичной термической обработке аморфной ленты в условиях воздействия постоянного магнитного поля, направленного ортогонально торцевой плоскости витков ленты, улучшение её магнитных свойств связано с уменьшением объёма 180° магнитных доменов (3), намагниченных при первичной термообработке перпендикулярно плоскости ленты, занимавших почти 30 % объёма в образцах.

С почти полным исчезновением перпендикулярно и продольно намагниченных доменов, магнитным полем формируется анизотропная структура из 180° доменов



Фрагмент локального распределения в ленте аморфного сплава продольных (1), поперечных (2), перпендикулярных (3) 180° и замыкающих (4) 90° доменов после стандартной термической обработки. → – направление намагниченности доменов



Фрагмент локального распределения в ленте аморфного сплава поперечных (1) 180° и замыкающих (2) 90° доменов после ТМО. → – направление намагниченности доменов

с направлением намагниченности вдоль приложенного поля. На боковых краях этой ленты образуются 90° домены, обеспечивающие замыкания магнитного потока и снижение магнитостатической энергии ленты.

В последующем, при измерениях магнитных характеристик изделий, намагничивающее силовое поле обмотки трансформатора направлено (как и в условиях применения измерительных трансформаторов тока) вдоль поверхности его ленты, то есть вдоль её продольной оси. Сформированные при ТМО замыкающие 90° домены становятся зародышами перемагничивания в направлении приложенного переменного поля, что позволяет снизить его напряжённость и уменьшить энергетические затраты на перемагничивание тороидальных и прямоугольных магнитопроводов. Это уменьшение обусловлено тем, что перемагничивание осуществляется по низкоэнергетическому механизму смещения доменных границ, а не по затратному механизму вращения (поворота) намагниченности.

При ТМО происходит процесс деформационного старения материала с последующим его влиянием на формирование дополнительной магнитной анизотропии за счёт взаимодействия компонентов материала с введёнными дефектами кристаллической решётки. При этом образуются кластеры с повышенным содержанием атомов растворённых элементов и сверхструктурой типа В2. Экспериментально показано, что оптимальным результатам ТМО соответствует определённое время выдержки при обработке. В иных условиях обработки процессы деформационного старения материала не оптимальны: либо формируется недостаточное количество кластеров, либо происходит аннигиляция структурных дефектов.

Таким образом, применение комплексного подхода в решении задач усовершенствования изготовления трансформаторных магнитопроводов на основе магнитомягких материалов в последовательности – вначале изготовление магнитопровода, а затем его модифицирование – существенно повышает его физико-механические свойства и превышает суммарный результат, достигаемый на отдельных этапах обработки [63].

Взаимодействие с сотрудниками лаборатории микромагнетизма ИФМ УрО РАН привело к развитию в лаборатории нового направления исследований. В частности, эти исследования отмечены в 2012 г. Дипломом Роспатента «100 лучших патентов России за 2011 г.» (В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский, Б.Н. Филиппов, А.В. Потапов, В.В. Шулика [62]), а также серебряной медалью и дипломом Международного салона изобретений в Женеве «За развитие современных аморфно-нанокристаллических материалов для инновационных применений в электротехнике и электронике» 14.04.2013 г.

Важнейшие научные и технические достижения лаборатории связаны с исследованием анизотропных электротехнических ста-

лей (АЭС, сплав Fe-3%Si) с целью улучшения их физических свойств [64–73]. В современных АЭС с ребровой кристаллографической текстурой (110)[001] намагниченность отдельных зёрен располагается вдоль осей легчайшего намагничивания [001] под малыми углами к поверхности ленты. Это приводит к малым магнитным полям рассеяния и широким полосовым 180° доменам. В результате при перемагничивании материала возникают большие скорости движения доменных границ и высокие магнитные потери на вихревые токи (до 80% от полных магнитных потерь). Эффективным способом уменьшения размеров доменов и магнитных потерь в сталях является введение упорядоченных магнитоструктурных барьеров (МБ), в частности, локальной лазерной обработкой (ЛЛО) [63–65]. Узкие зоны термической деформации, расположенные поперёк оси текстуры, приводят к снижению магнитных потерь в сильной зависимости от степени совершенства кристаллографической текстуры сплава.

В образцах АЭС высших марок 3408, 3409 с размерами зёрен 4–40 мм установлена возможность введения МБ в материал с магнитоактивным электроизоляционным покрытием практически без его разрушения. Покрытие на основе борсодержащего алюмо-фосфата с коэффициентом теплового расширения $KTP = (4-8) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, меньшим, чем у стали ($13 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$), растягивая сталь, вызывает уменьшение ширины основных 180° доменов, относительного объёма замыкающих 90° доменов и магнитных потерь на 5–8 %. Эффект существенно зависит от адгезии покрытия к металлу.

ЛЛО, наряду с измельчением доменов, создаёт в межзонах промежутках внутренние остаточные напряжения $\sim 0,5-1,0 \text{ кг/мм}^2$ разного знака, вызывающие изгиб ленты. Снижение полных магнитных потерь при ЛЛО образцов толщиной 0,28–0,30 мм стали 3408 (индукция $B_{800} = 1,93-1,94 \text{ Тл}$) с покрытием может составлять 18–24 %. Эффект двух последовательных воздействий – нанесение покрытия и лазерная обработка – превышает эффект каждого из них и почти аддитивен для материала с высокой степенью совершенства кристаллографической текстуры, аналогично воздействию комплекса термомагнитной и лазерной обработок [65]. Снижение полных магнитных потерь происходит за счёт уменьшения их вихревой составляющей на 30–35 %. Для повышения эффективности применения ЛЛО разработаны в ИФМ УрО РАН средства управления мощностью лазерного воздействия [63–65, 72, 73].

Однако для изготовления трансформаторных магнитопроводов обработанные листы АЭС подвергаются резке на отдельные элементы или на узкую ленту, а затем отжигают для снятия краевого наклёпа. В результате отжига при 600°C эффект от лазерной обработки стали снижается в 2 раза, а при $800-850^\circ\text{C}$ полностью исчезает. Это снижение эффекта ЛЛО обусловлено релаксацией в зонах лазерной обработки сжимающих напряжений

и вызванных ими нарушений однородной намагниченности и магнитных полей рассеяния. Поэтому восстановление однородного распределения намагниченности в материале, происходящее в результате отжига, сопровождается и восстановлением его исходной широкодоменной магнитной структуры, существовавшей до лазерной обработки, следовательно, возвращает к исходному уровню магнитных потерь.

Перспективное решение этой проблемы связано с искусственным введением лазерным воздействием мелкодисперсных примесных дефектов и формированием пластических деформаций в зонах обработки [74]. Наибольший результат можно получить путём создания высокой концентрации примесных дефектов в этих зонах.

Эффект примесной термостабилизации зон лазерного воздействия исследовали на образцах листовой АЭС марки 3407, $B_{800} = 1,89$ Тл, толщина листа 0,27 мм. В качестве основы дефектов применяли мелкодисперсные слабомагнитные вещества, имеющие намагниченность насыщения 100–300 Гс, например, борсодержащий магний-фосфат в составе покрытия или в виде порошка, насыпаемого на поверхность стальных листов. Образцы обрабатывали лазером с длиной волны 10,46 мкм. Затем проводили их отжиг при $t^\circ = 500\text{--}800$ °С.

В результате установлено, что комплексное воздействие ЛЛО и частичного расплава примесных дефектов на структуру исследуемых образцов, подвергнутых в последующей обработке отжигу при температуре 700 °С, сохраняет почти полную величину эффекта (13%), в то время как при обычной лазерной обработке этот эффект снижается в два раза (до 7%). При температуре 800 °С результаты обычной лазерной обработки практически исчезают, а представленная технология позволяет сохранять 2/3 величины эффекта снижения магнитных потерь (11%).

Как показали исследования, оптимальный подбор химического состава и создание повышенной доли примесных элементов в зонах лазерного воздействия позволяют сохранять устойчивость деформированного состояния материала и напряжённость магнитных полей рассеяния до более высоких температур, например, 600–800 °С, несмотря на проходящую релаксацию напряжений от лазерной обработки. При этом эффективность снижения магнитных потерь возрастает и с уменьшением толщины ленты, а также с увеличением степени совершенства её текстуры.

Отметим, что при формировании термостабилизации повышаются и прочностные свойства материала за счёт локального сжатия поверхности в этих зонах. Это особенно необходимо при обработке тонколистовых материалов.

Физическая суть эффекта примесной термостабилизации связана с тем, что мелкодисперсные примесные дефекты имеют намагниченность значительно меньшую, чем намагниченность са-

мого сплава, и отличаются коэффициентами теплового расширения. В этом случае они формируют в зонах лазерной обработки локальные напряжения, разориентировку магнитных моментов атомов. При этом повышаются магнитные поля рассеяния, которые создают замыкающие 90- и 180-градусные домены, то есть динамические зародыши перемагничивания. В результате этого создаются условия для повышения температурной устойчивости зон ЛЛО. Они сохраняются до более высоких температур отжига, который необходим в технологическом процессе для снятия краевого наклёпа в элементах трансформаторного магнитопровода.

Таким образом, применение примесной термостабилизации зон лазерного воздействия позволяет получать листовую АЭС с высокими физико-механическими свойствами, более устойчивыми к эксплуатационным воздействиям. Существенное увеличение качества стали при относительно малых технических и энергетических затратах на её обработку характеризует данную технологию как перспективную для широкого внедрения на производстве.

Однако при изготовлении электротехнических устройств вырезка отдельных элементов магнитопровода из ленты приводит к деградации свойства материала, а последующий отжиг, необходимый для снятия краевых напряжений, вместе с удалением напряжений удаляет и созданный лазером в материале эффект дробления доменов [63–67]. В связи с этим, актуальной задачей становится, оптимизация параметров магнитной доменной структуры не в ленте стали, а непосредственно в элементах магнитопровода [75–82].

Для улучшения магнитных свойств магнитопроводов использовали пластинчатые элементы из АЭС марки 3408 ([ГОСТ 21427.1–83]), аналогичные промышленным штампованным элементам для трансформаторов малой мощности ~ 14 кВА. На участки пластин, параллельные оси текстуры, зоны ЛЛО сжатию с промежутками 5 мм наносили поперёк оси текстуры. Это усиливало одноосную магнитную текстуру и уменьшало объём поперечно намагничен-

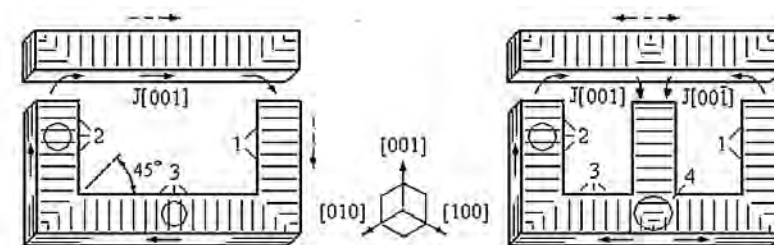
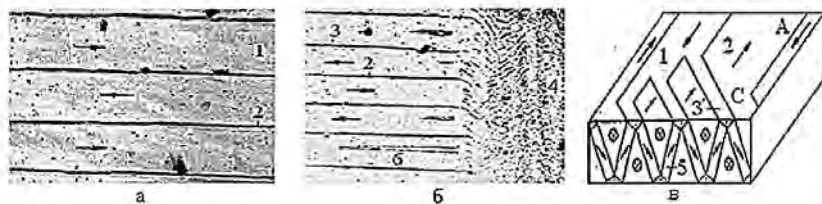


Схема оптимального формирования зон деформации лазером в отдельных прямоугольных ярмах, П- и Ш-образных пластинчатых элементах шихтованного магнитопровода стержневого (слева) и броневого (справа) трансформаторов. — — — — — направление прокатки [001] АЭС; 1, 2 — деформационные зоны лазерного воздействия на участках элемента с ориентацией [001] вдоль оси прокатки; 3 — участки элемента с ориентацией [110] поперёк оси прокатки; 4 — зона разделения магнитного потока в магнитопроводе



Полосовые 180° домены структуры типа А в элементе магнитопровода до (1, а) и после (3, б) ЛЛО, намагниченные вдоль оси $[001]$; 2 – 180° границы между доменами; 4 – зона тепловой деформации лазером, ориентированная поперёк оси $[001]$; 5 – полосы скольжения в деформированной области вблизи зоны лазерного воздействия; б – клиновидные зародыши перемагничивания. в – объемная схема доменов типа А с ориентацией намагниченности по оси $[001]$, внутриобъемных доменов 5 типа С с ориентацией намагниченности по осям $[100]$ и $[1-10]$, и поверхностных призматических $3'$ – по оси $[001]$

ных замыкающих доменов за счёт продольных растягивающих напряжений, возникающих между сжатыми зонами. Кроме этого, в 2 раза уменьшалась ширина продольно намагниченных полосовых доменов за счёт снижения их длины и возникновения новых клиновидной формы замыкающих доменов б – динамических зародышей перемагничивания.

На участки магнитопровода, поперечные относительно оси текстуры, зоны ЛЛО наносили вдоль оси текстуры. Это создаёт в межзонах промежутках растягивающие напряжения, ориентированные вдоль поперечного участка, что ослабляет в нём исходную продольную одноосную текстуру с осью $[001]$, заменяя её на поперечную двухосную анизотропию, которая отсутствует в листовой стали, облегчая ориентацию намагниченности по поперечным осям легкого намагничивания $[100]$ и $[010]$. При прохождении магнитного потока в этих участках магнитопровода на каждом цикле перемагничивания облегчается перестройка доменной структуры из типа А с намагниченностью доменов 1,2 по оси $[001]$ в структуру доменов $3'$ типа С с намагниченностью внутри объёмных доменов по осям $[100]$ и $[010]$. Именно путём такой перестройки и происходит процесс перемагничивания в ферромагнетике в магнитном поле, ориентированном поперёк оси текстуры [75–76].

Таким образом, при перемагничивании разная относительно оси текстуры ориентация зон лазерного воздействия в продольных и поперечных участках магнитопровода обеспечивает эффективно уменьшение ширины полосовых доменов, и оптимальное прохождение магнитного потока во всём объёме магнитопровода вдоль осей лёгкого намагничивания. В результате такой обработки продольных и поперечных элементов замкнутого магнитопровода магнитные потери в нём при перемагничивании существенно уменьшаются (табл. 3).

Из табл. 3 следует, что в шихтованном магнитопроводе стержневого трансформатора, П-образные и отдельные полосовые

элементы которого изготовлены из ленты АЭС марки 3408, толщиной 0,27 мм с магнитоактивным (растягивающим металл) электроизоляционным покрытием на основе магний-фосфатов, данный вид обработки приводит к снижению магнитных потерь $P_{1.7/50}$ на 9–12 %, а при последующих термической или терромагнитной обработках – на 14–16 %. В магнитопроводах из стали высшей марки 3409 эффект снижения магнитных потерь после указанной комбинированной обработки достигает 18 %, как и на отдельных моно- и поликристаллических лентах стали.

Таблица 3. Магнитные потери ($P_{1.7/50}$) стали марки 3408 при создании П-образного трансформаторного магнитопровода до и после ЛЛО

№ п/п	Материалы, обработки	$P_{1.7/50}$, Вт/кг	Сравнение операций	Изменения $P_{1.7/50}$, %
1	Рулонная сталь	1,12	–	–
2	Магнитопровод	1,38	1–2	–23
3	ЛЛО с одной стороны	1,22	2–3	–12
4	ЛЛО с двух сторон	1,19	2–4	–14
5	ЛЛО + ТО (500 °С)	1,19	2–5	–14
6	ЛЛО + ТМО (450 °С)	1,16	2–6	–16
7	Скрайбирование	1,25	2–7	–10

Аналогичным образом обрабатывали и Ш-образные магнитопроводы, учитывая сложное разветвление магнитного потока вблизи их средних и в угловых участках. В этом случае эффект снижения $P_{1.7/50}$ составлял 10–13 %.

Скрайбирование стали также приводит к зарождению новых продольно намагниченных полосовых 180° доменов вблизи поперечно и продольно ориентированных зон механического воздействия и комплексов замыкающих доменов с иным – поперечным направлением намагниченности вблизи этих зон. При этом роль линий скрайбирования, как источника измельчения доменов, сохраняется и после отжига, необходимых для снятия краевого наклёпа. Однако этот способ менее эффективен (табл. 3), его перспективное применение связано с созданием штамповочных матриц с рельефной формой скрайбирования, которую задают сменные лезвия.

В лаборатории также проводятся исследования по созданию нового класса композитной $ZrO_2-Yb_2O_3$ металлокерамики в условиях комплексного механоактивационного и термического воздействия [83–87]. Установлено, что при термической обработки в диапазоне 2000–2300 °С и скорости охлаждения ~50 град/мин формируется многофазная структура из кубической, тетрагональной и моноклинной модификаций. Применение низкотемператур-

ного отжига (1000 °С) на заключительной стадии обработки керамики, приводит к повышению её механических свойств. По уровню износостойкости получаемый материал, например, допированный иттрием, практически не уступает твёрдым сплавам на основе карбида вольфрама и кобальта.

Коллектив лаборатории в основном обеспечен оборудованием, необходимым для успешного выполнения работ.

- Современный инвертированный металлографический микроскоп MET 2 с увеличением от 100 до 1000 крат. Обработка полученных результатов проводится на компьютере.
- Установка для термоманитной обработки магнитомягких материалов, конструкционных сплавов и инструментальных сталей в постоянное магнитное поле до 120 кА/м при температуре до 1200 °С.

В.И. Пудов

Список литературы

1. М.Н. Михеев, Зав. лаб., № 7, 1155 (1938).
2. П.А. Халилеев, XX век моими глазами, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2001), 345 с.
3. Р.И. Янус, Л.А. Фридман, В.И. Дрожжина, Труды ИФМ АН СССР, Вып. 21, 313, (1959).
4. В.И. Дрожжина, Н.Н. Зацепин, Ю.Ф. Пономарёв и др., ФММ 10, 359 (1960).
5. М.А. Веденев, В.И. Дрожжина, Л.А. Фридман, Труды ИФМ АН СССР, Вып. 24, 110, (1965).
6. Ю.Ф. Пономарев, Л.А. Фридман, Труды ИФМ АН СССР, Вып.26, 118 (1967).
7. А.А. Литвиненко, Ю.Я. Реутов, В.И. Пудов, Дефектоскопия, № 8, 58 (1989).
8. В.И. Пудов, Ю.Я. Реутов и др. Пат. РФ № 2053712 (1996).
9. В.И. Пудов, Дефектоскопия, № 11, 33 (1997).
10. Ю.Я. Реутов, В.И. Пудов, Дефектоскопия, № 1, 28 (1998).
11. Ю.Я. Реутов, В.И. Пудов, Дефектоскопия, № 2, 18 (1998).
12. В.И. Пудов, Дефектоскопия, № 1, 19 (1999).
13. Ю.Я. Реутов, В.И. Пудов, Дефектоскопия, № 4, 15 (2000).
14. В.И. Пудов, Дефектоскопия, № 4, 18 (2000).
15. В.И. Пудов, Дефектоскопия, № 4, 28 (2000).
16. В.И. Пудов, С.В. Жаков, Дефектоскопия, № 7, 15 (2000).
17. В.И. Пудов, С.В. Жаков, Дефектоскопия, № 9, 36 (2000).
18. В.И. Пудов, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург (2000).
19. Ю.Я. Реутов, Классические магнитные экраны, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2006), 72 с.
20. А.А. Литвиненко, В.И. Пудов, В.П. Леман, Мед. техника, № 1, 42 (1992).
21. В.И. Пудов, Ю.Я. Реутов, С.А. Коротких и др., Мед. техника, № 4, 19 (1992).
22. Ю.Я. Реутов, В.А. Куликов, В.И. Пудов, Пат. РФ 2046377 (1995).
23. В.И. Пудов, В.А. Куликов, С.А. Коротких, Пат. РФ. 2058111 (1996).
24. В.И. Пудов, Ю.Я. Реутов, С.А. Коротких, Мед. техника, № 4, 23 (1996).
25. В.И. Пудов, Ю.Я. Реутов, С.А. Коротких, Мед. техника, № 5, 31 (1996).
26. В.И. Пудов, Ю.Я. Реутов, С.А. Коротких и др., Мед. техника, № 6, 28 (1996).
27. В.И. Пудов, Ю.Я. Реутов и др., Пат. РФ 2090137 (1997).
28. В.И. Пудов, Ю.Я. Реутов и др., Пат. РФ 2090138 (1997).
29. В.И. Пудов, Ю.Я. Реутов и др., Пат. РФ 2123302 (1998).
30. В.И. Пудов, Ю.Я. Реутов и др., Пат. РФ 2123303 (1998).
31. В.И. Пудов, Ю.Я. Реутов и др., Пат. РФ 2127076 (1999).
32. В.И. Пудов, Ю.Я. Реутов и др., Пат. РФ 2132638 (1999).
33. В.И. Пудов, Ю.Я. Реутов и др., Пат. РФ 2132639 (1999).
34. В.И. Пудов, Ю.Я. Реутов и др., Пат. РФ 2132640 (1999).
35. В.И. Пудов, Ю.Я. Реутов и др., Пат. РФ 2132641 (1999).
36. В.И. Пудов, Ю.Я. Реутов и др., Пат. РФ 2134538 (1999).
37. В.И. Пудов, С.А. Коротких и др., Пат. РФ 2295913 (2007).
38. С.А. Коротких, Е.В. Бобыкин, В.И. Пудов и др. Вестник офтальмологии, № 6, 17 (2008).
39. В.И. Пудов, Дефектоскопия, № 6, 26 (2006).
40. Ю.Я. Реутов, В.Е. Лоскутов, Дефектоскопия, № 11, 15 (2007).
41. Ю.Я. Реутов, В.И. Пудов, А.В. Волков, Дефектоскопия, № 9, 37 (2011).
42. А.С. Соболев, В.И. Пудов, В.П. Малюк, Дефектоскопия, № 12, 83 (2009).
43. В.И. Пудов, А.С. Соболев, С.В. Воронина, Изм. техника, № 5, 54 (2010).
44. В.И. Пудов, А.С. Соболев, Патент РФ 2455635, (2012).
45. А.С. Соболев, В.И. Пудов, Дефектоскопия, № 11, 22 (2014).
46. В.И. Пудов, А.С. Соболев, В.А. Бланин, Пат. РФ 2310838 (2007).
47. В.И. Пудов, А.С. Соболев, Пат. РФ № 2378645 (2010).
48. А.С. Соболев, В.И. Пудов, Изм. техника, № 7, 53 (2011).
49. А.С. Соболев, В.И. Пудов, Ю.И. Дидик, Изм. техника, № 8, 60 (2015).
50. А.С. Соболев, В.И. Пудов, Ю.И. Дидик, Изм. техника, № 7, 67 (2016).
51. В.И. Пудов, А.С. Соболев, Изм. техника, № 9, 59 (2008).
52. В.И. Пудов, А.С. Соболев, ФХОМ, № 4, 75 (2004).
53. В.И. Пудов, А.С. Соболев, ФХОМ, № 5, 94 (2004).
54. В.И. Пудов, А.С. Соболев, Ю.Н. Драгошанский, в сб. Труды XLVI Междунар. конф. Актуальные проблемы прочности материалов, УО ВГТУ, Витебск (2007), Ч. 2. С. 231.
55. В.И. Пудов, А.С. Соболев, Ю.Н. Драгошанский, Упрочняющие технологии и покрытия, № 6, 28 (2006).
56. А.С. Соболев, В.И. Пудов, Вестник ТГУ, сер. Естеств. и техн. науки 18, 1794 (2013).
57. Б.В. Берг, В.И. Пудов, А.С. Соболев и др. Тяжелое машиностроение 2, 52 (2012).
58. В.И. Пудов, А.С. Соболев, И.Ш. Трахтенберг и др., Пат. РФ 2273670 (2006).
59. В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский, Вестник ТГУ, сер. Естеств. и техн. науки 18, 2055 (2013).
60. V.I. Pudov, Yu.N. Dragoshanskii, A.S. Sobolev, в сб. Труды 53 Междунар. конф. Актуальные проблемы прочности материалов, УО ВГТУ, Витебск (2012), Ч. 1, С. 219.
61. В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский, в сб. Труды 53 Междунар. конф. Актуальные проблемы прочности материалов, УО ВГТУ, Витебск (2012), Ч. 1, С. 228.

62. В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский и др., Пат. РФ 2406769 (2010).
63. В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский и др., Пат. РФ 2510661 (2014).
64. Б.К. Соколов, Ю.Я. Реутов, В.И. Пудов и др., Дефектоскопия, № 3, 54 (2003).
65. Ю.Н. Драгошанский, Б.К. Соколов, В.И. Пудов и др., ДАН **391**, 44 (2003).
66. Ю.Н. Драгошанский, В.В. Губернаторов, В.И. Пудов, ФММ **111**, 5, 486 (2011).
67. Ю.Н. Драгошанский, В.В. Губернаторов, В.И. Пудов и др., ФММ **111**, 59 (2011).
68. Ю.Н. Драгошанский, В.И. Пудов, Неорг. материалы **49**, 714 (2013).
69. Ю.Н. Драгошанский, В.И. Пудов, Л.С. Каренина, Известия РАН, Сер. физ. **77**, 1495, (2013).
70. Ю.Н. Драгошанский, В.И. Пудов, ФХОМ, № 3, 48 (2013).
71. В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский, Упрочняющие технологии и покрытия, № 8, 44 (2013).
72. В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский, Пат. РФ 2501866 (2013).
73. В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский, Пат. РФ 2569260 (2015).
74. В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский, ДАН, **453**, 159 (2013).
75. В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский, Пат. РФ 2558370 (2015).
76. В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский, Пат. РФ 2565239 (2015).
77. В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский, ФММ **116**, 571 (2015).
78. В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский, ФТТ **58**, 252 (2016).
79. В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский, Вестник ТГУ, Сер. Естеств. и техн. науки **21**, 776 (2016).
80. Ю.Н. Драгошанский, В.И. Пудов, Вестник ТГУ, Сер. Естеств. и техн. науки **21**, 974 (2016).
81. В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский, в сб. *Труды XI Междунар. конф. Современные методы и технологии создания и обработки материалов. ФТИ НАН Беларуси, Минск (2016)*, 1, С. 248.
82. Н.Е. Миронюк, А.С. Соболев, В.И. Пудов, Электричество, № 2, 19, (2016).
83. И.Д. Кашеев, Ю.И. Комоликов, В.И. Пудов, Новые огнеупоры, № 7, 41, (2015).
84. V.D. Zhuravlev, Yu.I. Komolikov, L.V. Ermakova, *Ceramics International* **42**, 8005, (2016).
85. Ю.И. Комоликов, В.И. Пудов, Вестник ТГУ, сер. Естеств. и техн. науки **21**, 1058, (2016).
86. Ю.И. Комоликов, В.И. Пудов, в сб. *Тез. док. XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. УрО РАН, Екатеринбург (2016)*, 2а, С. 357.
87. Ю.И. Комоликов, В.И. Пудов, в сб. *Тез. док. XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. УрО РАН, Екатеринбург (2016)*, 2а, С. 358.

ОТДЕЛ

прецизионной металлургии и технологий обработки давлением

ЛАБОРАТОРИЯ

прецизионных сплавов
и интерметаллидов

Состав лаборатории

(по состоянию на 1 января 2017 год)

- Дегтярев Михаил Васильевич, заведующий лабораторией, д.т.н.
- Блинова Юлия Викторовна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Бобылев Игорь Борисович, старший научный сотрудник, к.х.н.
- Буданова Людмила Васильевна, ведущий инженер
- Валова-Захаревская Евгения Григорьевна, младший научный сотрудник
- Воронова Людмила Мееровна, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Давыдов Денис Игоревич, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Дерягина Ирина Леонидовна, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Есин Владимир Олегович, ведущий специалист-консультант, к.ф.-м.н.
- Зюзева Наталия Андреевна, старший научный сотрудник, к.х.н.
- Калетин Андрей Юрьевич, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Красноперова Юлия Геннадьевна, младший научный сотрудник
- Криницина Татьяна Павловна, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Кузнецова Елена Игоревна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Попова Елена Нахимовна, ведущий научный сотрудник, д.т.н.
- Постовалов Вадим Григорьевич, главный специалист
- Родионов Дмитрий Петрович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Романов Евгений Павлович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН
- Степанова Наталья Николаевна, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Сударева Светлана Васильевна, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Федорова Татьяна Григорьевна, ведущий технолог
- Фокина Елена Александровна, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Чашухина Татьяна Игоревна, старший научный сотрудник, к.т.н.

СЕКТОР

синтеза сплавов и монокристаллов

Состав сектора (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Акшенцев Юрий Николаевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н.
- Бажуков Леонид Павлович, кузнец на молотах и прессах 6 разряд
- Баранов Борис Николаевич, ведущий технолог
- Букин Сергей Владимирович, ведущий электроник
- Глазунов Николай Павлович, главный специалист
- Ризванова Асия Саяхутдиновна, технолог
- Целковый Александр Сергеевич, главный специалист
- Юдин Александр Вячеславович, главный специалист

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ прецизионных сплавов и интерметаллидов

Образование и эволюция лаборатории

Впервые лаборатория прецизионных сплавов образована в Институте на основании Постановления Президиума УФАН от 05.02.1951 г. Приказом № 15 по ИФМ от 10 февраля 1951 г. «О зачислении лаборатории прецизионных сплавов из Института химии и металлургии УФАН СССР» [1] в составе: Г.В. Гайдуков – зав. лабораторией, М.М. Белякова мл. науч. сотр., Д.П. Гончарук ст. лаборант, Г.М. Филончик ст. лаборант, Г.П. Лубнин лаборант. Однако, приказом по Институту № 235 от 23.09.1953 г. кандидат технических наук Гайдуков Григорий Васильевич был освобождён от обязанностей зав. лабораторией прецизионных сплавов в связи с исключением этой лаборатории из структуры Института. Прошло совсем немного времени, и в Постановлении Президиума Академии наук СССР от 26 апреля 1957 г. № 359 «Об итогах и перспективах деятельности Института физики металлов» было отмечено, что в Институте не используются современные методы получения чистых металлов и сплавов, методы выращивания монокристаллов. Позднее, 2 марта 1960 года, Бюро отделения физико-математических наук АН СССР отмечало недостаточность исследований на образцах очень чистых металлов и на монокристаллах. Причины сложившейся ситуации и Президиум АН СССР и Бюро отделения физико-математических наук АН СССР усмотрели в стеснённости в производственных площадях, недостаточности имеющегося оборудования, тяжёлых жилищных условиях научных работников и недоукомплектованности штатами.

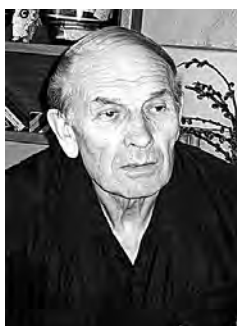
Лишь по прошествии ещё трёх лет, в течение которых выше указанные причины были, по-видимому, частично устранены, Постановлением № 24 от 11 января 1963 г. Президиума АН СССР в Институте создан отдел прецизионных сплавов и монокри-



Лель Вениаминович Смирнов, кандидат технических наук, заведующий отделом прецизионных сплавов и монокристаллов (1963–1987 гг.), лабораторией прецизионных сплавов (1987–1991 гг.), лауреат Государственной премии СССР. Специалист в области прецизионной металлургии, получения монокристаллов металлов и сплавов, термомеханической и магнитной обработки сталей и сплавов. Разработчик новых марок высокопрочных сталей, упрочняемых ВТМО. Автор 2 монографий, более 100 научных статей и авторских свидетельств. Подготовил 9 кандидатов наук.



Евгений Павлович Романов член-корреспондент РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, автор более 300 научных работ, подготовил одного доктора и 10 кандидатов наук. С 1986 по 2008 г. главный учёный секретарь УрО АН СССР (УрО РАН). Более пятнадцати лет состоял учёным секретарем научного комитета, исполнителем директором и членом попечительского совета Международного Научного Демидовского Фонда.



Юрий Николаевич Акшенцев кандидат технических наук, специалист в области прецизионной металлургии, получения монокристаллов металлов и сплавов. Заведующий лабораторией прецизионных сплавов (1991–2008 гг.). С 2008 г. руководитель сектора синтеза сплавов и монокристаллов. Заслуженный металлург РФ. Автор более 60 публикаций, имеет четыре авторских свидетельства. Созданные им моно- и поликристаллические образцы чистых металлов и прецизионных сплавов используются как для научного исследования в лабораториях Института, так и в промышленности.



Дегтярев Михаил Васильевич специалист в области деформационно-термических методов упрочнения сталей и сплавов. Доктор технических наук. Автор более 100 печатных работ (W&S), 2 авторских свидетельств. Подготовил 2 кандидатов наук.

сталлов [2]. Заведующим отделом назначен Лель Вениаминович Смирнов, один из авторов высокотемпературной термомеханической обработки – способа обработки широкого спектра сталей, предотвращающего развитие в них отпускной хрупкости [3].

В 1987 году отдел прецизионных сплавов и монокристаллов преобразован в отдел прецизионной металлургии в составе лабораторий: прецизионных сплавов (заведующие Л.В. Смирнов, затем Ю.Н. Акшенцев), интерметаллидов и монокристаллов (Е.П. Романов), кристаллизации (В.О. Есин), химико-аналитической группы (Е.И. Патраков, затем Л.Н. Кузьминых) и участка прецизионной металлургии (А.В. Юдин). Заведующим отделом прецизионной металлургии назначается Е.П. Романов.

В 2009 г. заведующим лабораторией прецизионных сплавов, а вскоре и заведующим отделом прецизионной металлургии, назначен М.В. Дегтярев, а Е.П. Романов получил пост научного руководителя отдела. В связи с изменением структуры института, в составе отдела сформированы лаборатория прецизионных сплавов и интерметаллидов (М.В. Дегтярев) и сектор синтеза сплавов и монокристаллов (Ю.Н. Акшенцев). Ранее (2005 г.) лаборатория кристаллизации была разделена между лабораторией интерметаллидов и монокристаллов и лабораторией цветных сплавов.

Оснащение оборудованием

К концу 60-х отдел прецизионной металлургии имел оборудование, позволяющее реализовать практически все существующие на тот момент металлургические технологии. По целевому финансированию были приобретены индукционные вакуумные печи садкой до 2,5 и до 10 кг, немецкая дуговая печь с нерасходуемым электродом, индукционные печи открытой плавки для литья слитков массой от 0,5 до 25 кг. Был запущен в эксплуатацию целый парк немецких печей для термической обработки материалов. До этого в отделе уже работало оборудование, изготовленное силами таких сотрудников как Евгений Александрович Вебер, Назыр Галимзянович Галимзянов, Геннадий Иванович Зайцев, Михаил Григорьевич Кожухов, Леонид Панкратьевич Отрошко, Георгий Михайлович Филончик, Аркадий Васильевич Чулков. Это индукционные установки вертикальной и горизонтальной плавки, выращивания монокристаллов методами Бриджмена и Чохральского. Отдел получил комплекс специальных установок для выращивания монокристаллов методами Бриджмена, Чохральского, электронно-лучевого нагрева, индукционной зонной плавки. В запуске их в эксплуатацию активное участие принимали Николай Григорьевич Кардальских, Яков Павлович Курицын, Николай Евгеньевич Карнашевский, Станислав Юрьевич Орлов.

Производственная деятельность по изготовлению сталей и сплавов осуществлялась бригадами. Печи открытой плавки обслуживали Л.П. Отрошко, Н.К. Малышев, М. Зырянов, В.П. Корнеев. Иногда к ним подключались В.И. Смышляев и С.А. Крючков. Бригадиром здесь был Алексей Иванович Кашин – специалист опытный, энергичный, со взрывным характером и непререкаемым мнением. Бригаду вакуумных печей возглавлял Геннадий Иванович Зайцев –



М.К. Корсунская



Н.В. Николаева



В.Е. Калинина

специалист высочайшей квалификации, характера спокойного, но упрямого. С ним работали упомянутые выше В.И. Смышляев и С.А. Крючков. На ростовых установках работали Н.Г. Галимзянов, А.В. Юдин, В.Г. Науменко, А.Р. Коэмец. Высочайшее мастерство в работе демонстрировали О. Маханек, Ю.П. Пивоваров и впоследствии С.А. Кудрявцев, проводя выплавку сплавов на дуговой вакуумной печи. Безоговорочным лидером на кузнечно-прокатном участке был Виктор Петрович Жигулев – мастер разносторонний и рукоястый, которому помогал Александр Борисович Добролюбов.

Отдел занял почти все площади здания прецсплавов, оборудование размещалось в здании гидроэкструзии и корпусе «А». В техблоке было организовано кузнечно-прокатное отделение, включающее два ковочных молота, два прокатных стана, машину ротационной ковки, волочильный стан, печи для нагрева и термообработки сталей с последующей закалкой в водяной, масляной и солевой средах. В главном корпусе зал в два этажа занимала грандиозная двухкамерная печь для получения металлических монокристаллов диаметром до 100 мм. Впоследствии её выселили из главного корпуса, и не найдя другого подходящего помещения, списали. По инициативе Л.В. Смирнова при отделе была организована химико-аналитическая группа (под руководством Людмилы Ярославны Кукало, затем Евгения Ивановича Патракова и Людмилы Николаевны Кузьминых) обеспечивающая проведение химического анализа металлоизделий. В то время на металлургическом производстве было занято до тридцати человек, из них непосредственно выплавку, ковку, прокатку и термообработку материалов осуществляли



Сидят: А.Д. Чернышева, Л.В. Волкова, М.В. Куимова, Л.Н. Кузьминых
 Стоят: Н.П. Салацкая, А.В. Краснова, Е.И. Патраков, Н.А. Алексашина, И.А. Малышева

двадцать сотрудников. Фактически в составе Института работал свой металлургический цех. Причём выполняли заказы не только подразделений Института, но и различных предприятий и организаций города, области, страны. Можно с уверенностью сказать, что в то время в стране не было подобной уникальной металлургической лаборатории. Звания «Заслуженный металлург РФ» удостоились Ю.Н. Акшенцев (2002 г.) и Н.Г. Галимзянов (2008 г.).

К настоящему времени всё это оборудование достигло, а то и перевалило за 50-летний возраст, однако успешно используется для выполнения заказов подразделений Института и внешних организаций. Лишь в 2007 г. сложение финансовых возможностей УрО и института позволило приобрести для отдела индукционную печь фирмы PVA TEPLA, позволяющую плавить и разливать в слитки массой до 0,4 кг металлы и сплавы в вакууме и в защитной атмосфере под давлением до 10 атмосфер.

Работу плавильного, ростового, термического и кузнечно-прокатного оборудования обеспечивают главные специалисты Александр Вячеславович Юдин, Николай Павлович Глазунов, Александр Сергеевич Целковский, ведущий технолог Борис Николаевич Баранов, ведущий электроник Сергей Владимирович Букин, кузнец Леонид Павлович Бажуков. Компьютеризированную плавильную печь PVA TEPLA обслуживает старший научный сотрудник Денис Игоревич Давыдов с помощниками из перечисленного персонала.

В 1992 году на базе отдела создали ООО «Армикс – Л», в котором сотрудниками отдела В.Н. Олесовым, М.Г. Любимовым, С.А. Кудрявцевым, В.П. Жигулевым, А.Б. Добролюбовым и В.В. Скорыниным под руководством д.т.н. А.Б. Кутьина было налажено производство трёх типов бронежилетов индивидуальной защиты, сертифицированных в МВД России. Бронежилетами снаряжались спецподразделения для поддержания порядка и выполнения других задач на Северном Кавказе.



Химическая лаборатория, 1979 г.
 Тарбеева Галина Михайловна (на переднем плане),
 Малышева Инна Альвиановна





Б.Н. Баранов, С.В. Букин, Л.П. Бажуков, А.С. Ризванова, В.П. Жигулев, Н.П. Глазунов, Ю.Н. Акшенцев, А.В. Юдин, А.С. Целковий

Научная деятельность в лаборатории

Исторически сложилось так, что исследования в отделе тематически были связаны с работами лаборатории физического металловедения и выполнялись совместно с сотрудниками этой лаборатории под руководством В.Д. Садовского, а руководители направлений – Л.В. Смирнов, Е.П. Романов, Д.П. Родионов – являются его учениками.

1. Исследования, выполненные на монокристаллах

Одной из целей создания лаборатории было обеспечение исследований, проводимых в Институте, монокристаллами различного химического состава. Получение монокристаллов металлов, сплавов и соединений представляет трудную задачу и в существенной степени является искусством. В связи с этим, большое практическое значение имеет разработка методик выращивания монокристаллов. В отделе разработаны (Л.В. Смирнов, Ю.Н. Акшенцев, Л.Д. Курмаева, Д.П. Родионов) технологические режимы и получены монокристаллы чистых металлов Fe, Cu, Ti и др., сплавов Fe-Si, Fe-Ni, Fe-Ni-Cr, сталей, жаропрочных сплавов, в том числе, интерметаллидов, а также особоочистые металлы и сплавы в поликристаллическом состоянии. Размеры синтезированных монокристаллов – длина 100–200 мм, диаметр до 25 мм – позволяют вырезать для исследования образцы различных ориентировок. Успешно разрабатывались также методики выращивания монокристаллов заданной ориентировки, основанные на вторичной рекристаллизации или рекристаллизации после критической деформации в ходе градиентного отжига. Так, выращены плоские монокристаллы трансформаторной стали ориентировок (110) и (100) размерами 200×25×0,5 мм и 100×9×0,5 мм, соответствен-

но. При этом установлены условия градиентного отжига (среда, температура и её градиент), величина предварительной деформации, содержание примесей, найдены оптимальные углы поворота при корректировке затравочного зерна относительно матрицы, обеспечивающие рост кристалла нужной ориентировки. Эти результаты получены Ларисой Дмитриевной Курмаевой и вошли в её кандидатскую диссертацию «Изучение процессов выращивания монокристаллов сплава Fe–3% Si методами рекристаллизации» (1975 г.), защищённую под руководством Б.К. Соколова и Л.В. Смирнова.

В отделе впервые получены монокристаллы конструкционных сталей, которые позволили установить новые данные о механизме мартенситного превращения в среднеуглеродистых сталях, понять природу явления обратимой отпускной хрупкости (ООХ) легированных сталей, изучить механизмы разрушения закалённых сталей. Большую работу по получению уникальных монокристаллов конструкционных сталей провёл тогда еще аспирант, а ныне главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, Лауреат Премии Совмина СССР, Заслуженный деятель науки РФ Дмитрий Петрович Родионов. Без участия и поддержки Л.В. Смирнова и А.Р. Коэмца и Ю.Н. Акшенцева невозможно было бы получение результатов, приведённых ниже.

Структура, свойства и превращения монокристаллов конструкционных среднеуглеродистых сталей исследованы в работах Л.В. Смирнова, В.М. Счастливецова и Д.П. Родионова, выполненных под руководством В.Д. Садовского. В этих работах установлены типы мартенситных пакетов, определена структура пакета, характеризующаяся набором из шести ориентировок, обнаружена их кристаллографическая «самосогласованность», определены ориентационные соотношения между мартенситом и аустенитом. Изучена кристаллография пластической деформации в пакете псевдомонокристалла закалённой стали.

Среди других результатов, полученных благодаря использованию монокристаллов, необходимо отметить следующие.

Установлено, что в закалённых псевдомонокристаллах конструкционных сталей обратимая и необратимая отпускная хрупкость в значительной степени подавлены [4]. Развитие обратимой отпускной хрупкости происходит в процессе самого отпуска независимо от того, сформировались ли границы зёрен в γ - или α -области [5]. Направленно закристаллизованные образцы теплостойких конструкционных сталей обладают значительными преимуществами перед поликристаллическими в условиях высокотемпературной ползучести, когда возможно межзёренное разрушение [6].

Л.В. Смирнов, Д.П. Родионов и Н.Н. Степанова установили, что в монокристаллах углеродистого марганцовистого аустенита



Л.Д. Курмаева

проявляется новый вид низкотемпературной хрупкости - транскристаллитное разрушение сколом по плоскости $\{111\}$ [7]. При этом направленно закристаллизованная сталь Гадфильда 110Г13 обладает более высокими значениями ударной вязкости по сравнению с поликристаллической в области температур от комнатной до 200 °С. Эти результаты вошли в кандидатскую диссертацию Натальи Николаевны Степановой «Структура и характер разрушения сталей в монокристалльном и направленно закристаллизованном состоянии» (1989 г., рук. Л.В. Смирнов).

В 80–90 гг. в отделе проводились исследования осесимметричных оболочек из монокристаллов сталей с различной структурой (ферритной, аустенитной, мартенситной), подвергнутых динамическому (взрывному) нагружению. Полученные результаты имели не только научное, но и важное прикладное значение и были использованы для развития технологии и создания сталей, предназначенных для изготовления новых образцов специальной техники. Эти результаты вошли в кандидатскую диссертацию Валерия Александровича Макридина, защищённую по секретной тематике. За разработку новых изделий Л.В. Смирнов и Д.П. Родионов удостоились в 1987 году премии Совета министров СССР.

Д.П. Родионовым и Н.Н. Степановой установлено ещё одно преимущество монокристаллов. Пружинная лента из холоднодеформированных монокристаллов теплостойкой хромоникелевой аустенитной стали с однокомпонентной текстурой типа α -латуни обладает существенно более высокой релаксационной способ-



1 ряд: Н.М. Щербакова, Л. Воронина, Е.Н. Попова, Е.В. Григорьева, Т.П. Криницина
2 ряд: Д.П. Родионов, В.А. Макридин, А.Б. Бухвалов

ностью в интервале температур 400–500 °С, чем аналогичная поликристаллическая лента.

Результаты исследования стальных монокристаллов защищены в докторской диссертации Д.П. Родионова «Структура и механические свойства стальных монокристаллов и псевдомонокристаллов» (1997 г.) и обобщены в монографии [8].

Отдельное место в деятельности лаборатории занимают исследования, выполненные на интерметаллидах. Л.В. Смирновым, Б.А. Гринберг, М.В. Пономаревым исследована эволюция дислокационной структуры интерметаллида TiAl при повышении температуры и определены температурные интервалы блокировки дислокаций различного типа. Впервые обнаружена блокировка одиночных дислокаций, связанная с их попаданием в глубокие долины рельефа Пайерлса, и наблюдались заблокированные сверхдислокации с вектором Бюргерса $a/2\langle 112 \rangle$. Стабильность дислокационной структуры, содержащей заблокированные одиночные дислокации различной ориентации исследована при нагреве *in situ* в колонне микроскопа. По результатам Михаилом Викторовичем Пономаревым защищена кандидатская диссертация «Эволюция дислокационной структуры интерметаллида TiAl с температурой» (1991 г.).

Использование импульсного воздействия в качестве метода синтеза интерметаллидов на основе Ti и Al позволило получить новую неравновесную фазу Ti₃Al в монокристаллическом состоянии. Микроструктура и температурная аномалия деформирующего напряжения интерметаллида Ti₃Al исследованы под руководством Е.П. Романова и Б.А. Гринберг и защищены в кандидатской диссертации Елены Валерьевны Пановой «Микроструктура и температурная аномалия деформирующего напряжения интерметаллида Ti₃Al» (1997 г.). Исследование микропроцессов разрушения монокристаллов Ti₃Al внесло существенный вклад в решение проблемы низкотемпературной хрупкости этого интерметаллида. Обнаруженные особенности деформационного поведения и микроструктуры Ti₃Al полезны при разработке способов упрочнения промышленных сплавов на основе α_2 -фазы.

Существенную часть научной работы лаборатории составляют исследования монокристаллических и направленно закристаллизованных жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов.

Ю.Н. Акшенцевым, В.В. Волковым и Л.В. Смирновым систематически исследованы физико-химические свойства эвтектики Ni–Ni₃Ti в литом и направленно закристаллизованном состояниях. Определены оптимальные параметры кристаллизации, обеспечивающие наибольшую прочность материала. Выяснено, что высокая хрупкость композиции в интервале температур 20–400 °С связана с распадом пересыщенного γ -твёрдого раствора с выделением γ' и η фаз, и определены режимы термической обработки, существенно улучшающие механические характеристики сплава.



Н.Н. Степанова

Установлено, что направленно закристаллизованная эвтектика сохраняет направленность и дисперсность вплоть до 1200 °С (0,96 Тпл), благодаря чему по сопротивлению ползучести при температурах 800–1000 °С многократно превосходит литую структуру. Стойкость против окисления позволяет использовать направленно закристаллизованную эвтектику в качестве конструкционного материала до температуры 1000 °С. Под руководством Л.В. Смирнова Владимиром Васильевичем Волковым в 1975 г. защищена диссертация «Исследование направленно закристаллизованного эвтектического сплава Ni–Ni₃Ti».

Соединение Ni₃Al (γ -фаза) является основной упрочняющей фазой современных никелевых жаропрочных сплавов. Ему свойственны температурные аномалии деформационных характеристик и связанный с ними эффект термического упрочнения. В работах Д.П. Родионова, Н.Н. Степановой, Ю.Н. Акшенцева, В.А. Сазоновой исследованы тройные сплавы на основе интерметаллического соединения Ni₃Al–X, где X= Nb, Ti, V, W, Cr, Fe, Co. Установлено, что при нагреве этих сплавов имеет место расслоение твёрдого раствора, связанное с растворением γ -фазы. Показано, что устойчивость интерметаллидной γ -фазы к растворению при высокотемпературном нагреве можно повысить высокотемпературной обработкой расплава (ВТОР) и введением в расплав ультрадисперсного порошка карбонитрида титана, и отработаны технологические режимы кристаллизации при получении монокристаллических отливок. Повышение совершенства кристаллической структуры и фазовой стабильности обеспечивает почти двукратное увеличение длительной прочности монокристаллических образцов из сплава ЖС-32 при температуре 1000 °С. Эти результаты вошли в докторскую диссертацию Н.Н. Степановой «Фазовые превращения в тройных интерметаллидах на основе Ni₃Al и жаропрочных никелевых сплавах и структура в монокристаллическом состоянии» (2004 г.).

Проведение Д.П. Родионовым, Д.И. Давыдовым, Н.Н. Степановой и Ю.И. Филипповым высокотемпературных испытаний активным нагружением на растяжение в интервале температур 1200–1250 °С показало высокую пластичность интерметаллического соединения Ni₃Al. Относительное удлинение монокристаллических образцов <100> достигает 155 %, что обусловлено динамическим возвратом.

При исследовании жаропрочных сплавов ЧС-70ВИ и ЭП-800 после эксплуатации на газотурбинной установке по экспериментальному режиму при повышенной мощности, Ю.Н. Акшенцевым, Д.И. Давыдовым, Д.П. Родионовым и Н.Н. Степановой в соавторстве с коллегами из других лабораторий обнаружено явле-

ние деформационно-индуцированного магнетизма (повышение на 3 порядка значений магнитной восприимчивости сплава в результате деформации), связанное с образованием устойчивых комплексов дефектов внутри интерметаллидной упрочняющей фазы. Установленная корреляция между количеством структурных дефектов и значением магнитной восприимчивости является основой для неразрушающего контроля изделий из аустенитных сплавов на основе Ni₃Al. Результаты вошли в диссертацию Дениса Игоревича Давыдова «Структура сплавов на основе Ni₃Al после высокотемпературной деформации», защищённую под руководством Н.Н. Степановой в 2011 г.

Монокристаллические образцы, не содержащие высокоугловых границ, наилучшим образом подходят для исследования процессов, происходящих при горячей деформации, в частности – динамической рекристаллизации (ДР). Закономерности этого процесса установлены в работах, выполненных под руководством Владимира Ильича Левита, еще одного из учеников В.Д. Садовского, на монокристаллах жаропрочного сплава типа нимоник. Размеры монокристаллов сплава ХН77ТЮР, выращенных в отделе, позволили вырезать из них образцы различных ориентаций и продеформировать их растяжением при температурах 1000–1200 °С. Преимущество этого способа деформации заключается в возможности немедленного охлаждения образца после остановки деформации для подавления постдинамической и статической рекристаллизации. В проведённых позднее работах Р.О. Кайбышева и А.Н. Белякова, применивших деформацию сжатием (осадкой), постдеформационные процессы существенно



Д.И. Давыдов

исказили результаты. Благодаря использованию монокристаллов удалось надёжно фиксировать начало динамической рекристаллизации по появлению в кристалле ориентировок, отличных от исходной. В.И. Левит и Н.Д. Бахтеева, применив для описания активной деформации на установившейся стадии параметр Холломоны-Зинера (температурно-скомпенсированную скорость деформации), ранее использованный при описании ползучести, выделили 3 области структурного состояния, соответствующие различным механизмам горячей деформации (горячему наклепу, динамической рекристаллизации и динамическому возврату) [9]. Позднее, в соавторстве с Л.С. Давыдовой и Н.А. Смирновой В.И. Левит убедительно показал отсутствие связи ДР с деформационным двойникованием, которое рядом исследователей рассматривается как один из механизмов ДР [10].

2. Термомеханическая обработка

Высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО) предложена в Институте физики металлов в 1954 г. Её авторы В.Д. Садовский, Л.В. Смирнов и Е.Н. Соколов, изучая влияние рекристаллизации наклепанного аустенита на обратимую отпускную хрупкость стали, обнаружили интересную закономерность. Если горячедеформированный аустенит не претерпевал перед закалкой рекристаллизации, то развитие обратимой отпускной хрупкости подавлялось: исчезал провал ударной вязкости после отпуска в интервале температур отпускной хрупкости, а вместо хрупкого интеркристаллитного излома наблюдался вязкий транскристаллитный. Если же горячедеформированный аустенит рекристаллизовался, отпускная хрупкость лишь в некоторой степени ослаблялась вследствие измельчения зерна аустенита. Таким образом, суть метода ВТМО заключается в закалке наклепанного нерекристаллизованного аустенита [11]. Воспроизводимость эффекта была достигнута на оборудовании сортопрокатного цеха Серовского металлургического завода на образцах сечением 43 см².

В отделе продолжились работы по изучению перспектив использования ВТМО при производстве горячекатаной металлопродукции. Осуществлялся поиск рациональных режимов ВТМО конструкционных легированных сталей, как среднеуглеродистых, так и безуглеродистых мартенситностареющих.

Так, оказалось, что упрочнение мартенситностареющей стали, подвергнутой ВТМО, осуществляется не только за счёт измельчения мартенситных пакетов, что является следствием наклепа аустенита, но и за счёт измельчения и увеличения количества дисперсионно упрочняющей фазы, выделяющейся при старении. Однако упрочнённая ВТМО сталь имеет большую склонность к рекристаллизации в альфа-состоянии, чем сталь после обычной закалки. Показано также, что ВТМО изменяет характер разрушения с интеркристаллитного на транскристаллитное и может использоваться как метод борьбы с тепловой хрупкостью мартенситноста-

реющих сталей. По этим результатам Грачик Егизевич Балманукян защитил диссертацию «Исследование режимов ВТМО конструкционной легированной стали 37ХНЗ и мартенситностареющей стали Н12К7М5ТЮ» (1979 г., руководители Л.В. Смирнов, А.Б. Бухвалов).

Результаты диссертационной работы Анатолия Борисовича Кутьина «Исследование высокоочищенной конструкционной стали типа 37ХНЗ», 1976 г., выполненной под руководством В.Д. Садовского и Л.В. Смирнова показали, что использование термомеханической обработки для упрочнения высокоочищенной стали типа 37ХНЗ затруднено из-за интенсивной рекристаллизации аустенита при ВТМО и значительного ускорения бейнитного распада при низкотемпературной ТМО. При этом уже за счёт повышения чистоты стали температура порога хладноломкости снижается на 40–50 °С после отпуска при оптимальной температуре (в вязком состоянии) и более чем на 200 °С после отпуска в интервале развития обратимой хрупкости.

Одним из научных направлений, в которых участвовали А.Б. Кутьин и Л.В. Смирнов, было выяснение причин появления камневидного излома в высокоочищенных сталях электрошлакового переплава после стандартной термической обработки. Эти работы выполнялись под руководством В.Д. Садовского совместно с сотрудниками лаборатории физического металловедения Н.М. Гербих и А.М. Поляковой. Камневидный излом является браком в высокопрочных сталях технической чистоты, поскольку связан с появлением при перегреве по границам зёрен сульфидных выделений, приводящих к снижению ударной вязкости. Как оказалось, в высокоочищенных сталях камневидный излом также обусловлен выделением сульфидов. Однако вследствие малого содержания серы сульфиды полностью растворяются при стандартных температурах нагрева и при медленном охлаждении выделяются по границам зёрен. При быстром охлаждении сульфиды в виде плёнок выделяются в теле зерна, что приводит к транскристаллитному излому и низкой ударной вязкости, представляя новый вид хрупкости. На основании полученных результатов, вошедших в докторскую диссертацию А.Б. Кутьина «Структура, свойства и разрушение предварительно перегретой конструкционной стали с низким содержанием серы» (1991 г.), предложены способы исправления структуры стали.

Как известно, эффективность ВТМО связана с закалкой деформированного нерекристаллизованного аустенита, что требует тщательного контроля температуры прокатки, использования сравнительно малых обжатий и быстрого охлаждения. В ЦНИИЧМе имени И.П. Бардина в 70-х годах разрабатывались режимы термоупрочнения закалкой с прокатного нагрева.



А.Б. Кутьин

Эффективность этой обработки связана с измельчением зерна в стали за счёт рекристаллизации аустенита или феррита. Для достижения эффекта прокатку вели при высоких температурах с большими обжатиями с использованием постдеформационной паузы. Это, несомненно, более «технологичный» режим, не требующий высокой производственной дисциплины. Однако измельчение зерна не устраняло проявления отпускной хрупкости. Сделать сталь не критичной к температуре нагрева и скорости охлаждения можно путём микролегирования. Под руководством Л.В. Смирнова исследованы процессы, протекающие при горячей деформации в среднеуглеродистой стали, микролегированной ванадием, ниобием или титаном, и разработаны режимы обработки, обеспечивающие эффект ВТМО в широком диапазоне температур (750–1000 °С) и степеней деформации (30–90 %) и при длительных последеформационных выдержках. Промышленное опробование предложенной технологии позволило повысить уровень механических свойств стали 12Х2НВФА, снизить трудозатраты и энергоёмкость процесса. Результаты этих исследований вошли в кандидатскую диссертацию Елены Венедиктовны Григорьевой «Формирование структуры микролегированных V, Nb и Ti конструкционных сталей при ВТМО для улучшения механических свойств» (1987 г.).

В 60–70-е гг. изучалась возможность наследования термомеханического упрочнения сталей при повторной закалке. Под руководством В.Д. Садовского и Л.В. Смирнова сотрудник отдела Арсентий Борисович Бухвалов исследовал причины дополнительного упрочнения при повторной закалке предварительно упрочнённой стали и условий, при которых проявляется этот эффект. Оказалось, что наследование упрочнения проявляется при очень быстром или медленном нагреве, когда аустенит образуется в условиях структурной наследственности. Дополнительное упрочнение при повторной закалке предварительно упрочнённой стали может быть связано с измельчением аустенитного зерна (А.Б. Бухвалов, дисс канд. техн. наук «Наследование упрочнения при термической и термомеханической обработке стали», 1970 г.).

За работу «Создание научных основ и технологий термомеханического упрочнения сталей и сплавов» Л.В. Смирнов совместно с С.Н. Петровой был удостоен Государственной премии СССР (1989 г.).

Термомеханическому упрочнению сталей посвящены также работы М.В. Дегтярева. М.В. Дегтярев поступил на работу в Институт в 1980 г. по приглашению В.И. Левита, незадолго перед этим избранного на должность ст. научн. сотр. отдела гидроэкструзии и формирующей исследовательскую группу, одной из первоочередных задач которой планировалась разработка режимов упрочнения сталей со структурой мартенсита и бейнита. Эта работа выполнялась по заданию ГКНТ СССР совместно с ЦНИИ ЧМ

имени И.П. Бардина. Ранее, в ИФВД АН СССР, стали типа 30ХНЗ после закалки на мартенсит удалось продеформировать методом гидроэкструзии с противодействием до суммарной степени 50 %. В результате их прочность достигла 2500 МПа при относительном удлинении 10–12 %. Однако упрочнение после деформации выше 20 % было незначительным, а конечный диаметр экструдатов составил всего 3 мм, что не позволило даже определить ударную вязкость. Задачей было получить такие же свойства на образцах диаметром 10–12 мм. В эти же годы в МИСиС под руководством профессора В.А. Займовского осуществили процесс, совмещающий изотермический распад аустенита по бейнитной ступени с деформацией растяжением. Несмотря на реализацию в материале пластичности, наведённой превращением, достижению степени деформации больше 30% препятствовало разрушение образцов. Предполагалось, что применение высокого гидростатического давления позволит достичь более высокой деформации. Задание ГКНТ выполнили сотрудники отдела гидроэкструзии (с 1981 г. – отдела высоких давлений) к.т.н. Б.И. Каменецкий, к.т.н. В.И. Левит, к.т.н. Л.С. Давыдова, М.В. Дегтярев, Н.А. Смирнова, В.И. Чмель. При этом был преодолён ряд технологических трудностей. В частности, можно привести такой пример.

Для снижения давления выдавливания при гидроэкструзии твёрдых материалов на поверхность образца наносят гальваническое покрытие. При этом из-за наводороживания образцы закалённой на мартенсит стали приобрели хрупкость и при деформации растрескивались. Пришли Левит и Дегтярев к Л.В. Смирнову, спрашивают, как быть. Лель Вениаминович предложил вместо гальваники использовать ванну с расплавом кадмий-олово, температура расплава будет всего 150 °С. Ему говорят: олово у нас есть, а где взять кадмий. ЛВ, не вставая со стула, достаёт из своего стола чушку граммов на 400. Вам, говорит, хватит. На этом примере современный исследователь может убедиться в подавляющем превосходстве социалистической системы при проведении НИР. Сейчас проведение закупки кадмия может занять более месяца. А тогда, в 1981 г., на следующий день образцы «обмакнули» в расплав и за неделю всю партию продеформировали. За один проход достигли деформации 24%, а за четыре – 48%. Требуемые характеристики прочности и пластичности были достигнуты. Оказалось, что во всём интервале деформаций прочность сталей 37ХНЗА и 30ХГСН2А возрастает, а также повышается устойчивость структуры и свойств к отпуску вследствие закрепления дислокационной субструктуры атмосферами углерода и дисперсными карбидами. Другой важный результат – сохранение порога хладноломкости на уровне, свойственном закалённой стали,



А.Ю. Калетин

и исчезновение провалов ударной вязкости, обусловленных отпускной хрупкостью [12].

Как и предполагали, метод гидроэкструзии оказался пригодным для деформации стали в процессе бейнитного превращения при температуре изотермы. В области образования нижнего бейнита при деформации на 50 %, вследствие ускорения и увеличения полноты бейнитного превращения, длительности деформации и превращения оказались сопоставимы, и сформировалась дисперсная структура бескарбидного бейнита с низким содержанием остаточного аустенита (3 % против 30 % после обычной изотермической закалки). Такая структура обеспечила одновременное повышение прочности, пластичности и вязкости. Эти результаты были представлены в диссертации М.В. Дегтярева «Упрочнение сталей со структурой мартенсита и бейнита методом гидроэкструзии» (1988 г., рук. В.М. Счастливец).

В настоящее время вновь проявляется интерес к сталям со структурой бескарбидного бейнита. Эти исследования в лаборатории выполняются Андреем Юрьевичем Калетиным. Ранее в работах А.Ю. Калетина, выполненных под руководством В.Д. Садовского, установлен двухстадийный характер бейнитного превращения при изотермической закалке в конструкционных сталях, легированных кремнием или алюминием. На первой стадии образуется структура бескарбидного бейнита, содержащая до 40 % остаточного аустенита, стабильного при комнатной температуре и при охлаждении вплоть до температуры жидкого азота. Стабильность остаточного аустенита обусловлена существенным обогащением по углероду (более 1 %). Структура бескарбидного бейнита обеспечивает высокую ударную вязкость и трещиностой-

кость стали. Вторая стадия – распад непревращённого аустенита с выделением карбидов – приводит к существенному снижению ударной вязкости [13]. В легированных сталях, не содержащих кремний и алюминий, для получения структуры бескарбидного бейнита требуется уменьшение содержания углерода до 0,10–0,15 %.

3. Структурное превращение в сталях под действием сильного импульсного магнитного поля (магнитная закалка стали)

В 50-х гг. XX в. в лаборатории электрических явлений под руководством И.Г. Факидова была создана установка сверхсильных импульсных магнитных полей, позволившая приступить к исследованию влияния магнитного поля на кинетику и полноту превращения аустенита, структуру мартенсита и его превращения при нагреве, а также на механические свойства стали. В исследованиях, проводившиеся под руководством В.Д. Садовского, а затем – В.М. Счастливецова, большой вклад внесли сотрудники отдела Л.В. Смирнов, Е.А. Фокина,



Е.А. Фокина

Е.П. Романов, В.Н. Олесов. Уже в 1965 г. Елена Александровна Фокина защитила диссертацию «Влияние импульсного магнитного поля на мартенситное превращение в сталях», в которой показала, что с ростом напряжённости импульсного магнитного поля мартенситное превращение смещается в область более высоких температур, и увеличивается полнота превращения при данной температуре. Результаты этой работы позволили предложить принципиально новую схему низкотемпературной термомеханической обработки, обеспечивающей высокую прочность стали. Работы в этом направлении продолжились [14, 15].

Следует отметить также участие Е.А. Фокиной в исследованиях влияния режимов обработки сталей на морфологию и количество остаточного аустенита и его роли в формировании механических свойств стали [16, 17].

4. Кристаллизация

Проблема кристаллизации, включающая изучение образования и роста кристаллов, фактически, была в тематике Института с самого начала его образования. Тематический план УралФТИ на 1935 год содержал тему: «Налаживание стандартных методов выращивания монокристаллов». Для развития этой тематики был приглашён иностранный специалист, крупный учёный в этой области – профессор Иван Николаевич Странский, возглавивший лабораторию кристаллизации, созданную в ноябре 1936 г. Планами лаборатории предполагались исследования кинетики кристаллизации из расплава и из газообразного состояния. После вынужденного отъезда И.Н. Странского из страны в 1937 г. лаборатория прекратила своё существование. Однако исследование кристаллизации металлов в Институте продолжалось в лаборатории механических явлений под руководством М.В. Якутовича до его участия в атомном проекте.

Необходимость возрождения в Институте, находившемся в центре металлургического Урала, научного направления по изучению кристаллизации металлов, а также потребность получения чистых металлов и синтеза совершенных монокристаллов для развития собственных исследований, привела к организации в конце 1958 г. при лаборатории металловедения под руководством В.Д. Садовского группы кристаллизации в составе А.А. Кралиной, окончившей аспирантуру у В.И. Архарова, и В.О. Есина, направленного в лабораторию металловедения после окончания УрГУ. Сотрудники группы кристаллизации были направлены для стажировки: А.А. Кралина – в Институт Металлофизики АН УССР для оз-



И.Н. Странский
(02.01.1897 – 19.06.1979)
Основатель болгарской физико-химической школы, на 3-ей Международной конференции по росту кристаллов в связи с 75-летним юбилеем он был признан «the father of crystal growth»



М.В. Якутович
(10.08.1902 – 20.06.1988)



И.Г. Демчук, А.А. Кралина, Н.А. Панжев, В.О. Есин 1963 г.

накопления с рентгеновскими методами исследования мозаичной структуры металлических монокристаллов, а В.О. Есин – в Ленинград, в Физико-технический институт АН СССР, для ознакомления с методом аномального (диффузного) рассеяния рентгеновских лучей. В 1958–1960 гг. в Институт стали возвращаться сотрудники, привлечённые в свое время к участию в атомном проекте. Предполагал вернуться и Михаил Васильевич Якутович, чтобы возглавить новую лабораторию, близкую ему по тематике. Даже обсуждал с В.О. Есиным тематику будущих исследований. Однако в Институт он не вернулся.

Позднее группа вошла в состав лаборатории прецизионных сплавов, а в 1969 г. после отъезда В.И. Архарова в Донецкий Научный Центр, на базе лаборатории диффузии была вновь создана лаборатория кристаллизации под руководством В.О. Есина. В 1987 г. лаборатория кристаллизации вошла в состав отдела прецизионной металлургии.



Есин Владимир Олегович, кандидат физико-математических наук, с 2005 г. ведущий научный сотрудник отдела прецизионной металлургии. Ведущий специалист в области физики образования и роста кристаллов из расплава. Автор 135 научных статей и 12 изобретений. Подготовил 10 кандидатов наук. Награждён медалями «За доблестный труд» и «Ветеран труда».

В.О. Есин состоял членом Научного Совета по проблеме «Образование и структура кристаллов» и вёл большую работу по координации научно-исследовательских работ в Уральском регионе, руководил работой городского семинара по этой проблеме.

Уже в первый год деятельности группы кристаллизации были созданы две установки: для выращивания монокристаллов методом Бриджмена и для многократной зонной перекристаллизации для рафинирования металлов. С 1958 по 1963 г. исследовано влияние чистоты металла, кристаллографической ориентации и морфологии поверхности фронта кристаллизации на структурное совершенство монокристаллов, образующихся при направленном затвердевании расплава алюминия и олова. По результатам этих исследований В.О. Есин защитил первую в Институте диссертацию по кристаллизации: «Направления преимущественного роста металлургических кристаллов из расплава» (рук. В.И. Архаров, 1964 г).

После воссоздания в Институте лаборатории кристаллизации научно-исследовательские работы в ней осуществлялись в рамках общей проблемы «Образование и структура кристаллов» (Отделение Общей Физики и Астрономии АН СССР), Научный Совет по этой проблеме возглавлял академик Б.Г. Вайнштейн, директор Института Кристаллографии АН СССР.

Тематика лаборатории включала основные научные направления физики кристаллизации, начиная от изучения атомной структуры межфазной поверхности кристалла с расплавом и кончая разработкой эффективных способов управления дислокационной структурой монокристаллов, регулирования ликвиционной неоднородности и измельчения зерна в крупногабаритных слитках промышленных сплавов. В составе лаборатории существовали следующие научные группы.



Сотрудники лаб. кристаллизации (2003 г. – В.О. Есину 70 лет) Сидят: Т.Г. Федорова, В.И. Данилюк, В.О. Есин, А.С. Кривоносова, И.Г. Ширинкина, В.Г. Манаков. Стоят: И.Ж. Саттыбаев, Е.В. Агапова, Л.П. Тарабаев, Д.М. Тагирова, Д.В. Башлыков, И.Г. Бродова, В.А. Сазонова, М.М. Чунтонова, А.Б. Манухин, Т.И. Яблонских



Р.Ш. Насыров

Теоретики, В.О. Есин, В.И. Данилюк, Л.П. Тарабаев, В.Н. Порозков, А.Ю. Машихин, И.А. Вдовина, исследовали атомную структуру межфазной поверхности кристалла и морфологию диссипативных структур, образующихся в процессе неравновесного затвердевания расплава. Создан пакет прикладных программ компьютерного моделирования процесса направленной кристаллизации расплава, применимых для оптимизации технологии получения монокристаллов многокомпонентных сплавов и синтеза композиционных материалов.

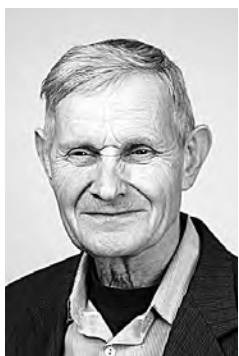
Группой синтеза монокристаллов тугоплавких металлов, возглавляемой Р.Ш. Насыровым (Д.М. Тагирова и В.Г. Манаков), сконструирована и изготовлена установка бестигельной электронно-лучевой зонной плавки металлов в высоком вакууме, позволяющая проводить рафинирование и направленную кристаллизацию W, Ta, Mo, Nb, Re и получать крупные монокристаллы этих тугоплавких металлов высокой степени чистоты.

А.А. Кралина руководила группой исследования структурных дефектов монокристаллов (Т.В. Жолтикова, В.Б. Воронцов, В.А. Сазонова, Л.В. Пузанова, Е.В. Агапова), А.И. Моисеев – группой синтеза сверхпроводящих соединений (Т.А. Угольников, А.Г. Шкловский, И.Л. Яковлева, В.Г. Кухарчук, Е.Д. Востриков), Г.Н. Панкин – группой исследования кристаллизации промышленных сплавов (И.Г. Бродова, В.В. Пономарев, Н.К. Шевченко, И.П. Коршунов), А.С. Кривоносова – группой исследования влияния давления на кристаллизацию (И.Ж. Саттыбаев, С.А. Ревун, Т.Г. Федорова). В разное время составы и тематика групп менялись. В 1974 г., когда в лаборатории появилось перспективное направление «Исследование фазового перехода при высокоскоростной кристаллизации металлов и сплавов», была создана установка, позволяющая проводить кристаллизацию расплава со скоростями до 10⁶ град./сек., и начались исследования влияния скорости охлаждения и предварительной температурно-временной обработки расплава на структуру, фазовый состав и свойства промышленных сплавов на основе Al и Fe. Другая установка создана для исследования влияния давления инертной газовой среды при кристаллизации расплава на дислокационную структуру монокристаллов, получаемых методом Бриджмена. Совместно с лабораторией гидроэкструзии (В.М. Гундырев) разработан способ получения рентгеновских дифракционных топограмм кристаллов, и сконструирована рентгеновская топографическая камера высокого разрешения для исследования дислокационной структуры монокристаллов.

В лаборатории велась также работа по совершенствованию технологии получения промышленно важных материалов с требуемым уровнем эксплуатационных свойств с предприятиями ВПК, такими как Верхнее-Салдинский Металлообрабатывающий завод (ВСМОЗ), ВИЛС, НПО «Сатурн», Каменск-Уральский



А.С. Кривоносова



В.Г. Постовалов

Металлургический завод (КУМЗ), НПО «Магнетон», Пышминский Опытный химико-металлургический завод (ОХМЗ) ГИРЕДМЕТ, Свердловский Научно-исследовательский технологический институт (НИТИ), и др. Нужно отметить, что с 1969 по 1974 г. выполнены большие работы по технологии получения монокристаллов молибдена и вольфрама с предприятием п/я 2572, входившим в общую структуру НПО, возглавляемого С.П. Королевым, (совместно с отделом прецизионных сплавов и монокристаллов и лаб. гидроэкструзии).

В процессе выполнения этих работ сотрудниками лаборатории получено 22 Авторских Свидетельства на изобретения, защищены 12 кандидатских диссертаций и 1 докторская:

Панкин Георгий Николаевич «Влияние анизотропии подвижности межфазной границы кристалл-расплав на кинетику роста дендритов олова», 1973 г.

Данилюк Владимир Иванович «Моделирование на ЭВМ структуры межфазной границы и роста кристалла с ГЦК структурой», 1976 г.

Кривоносова Алиата Саввична «Влияние ориентации межфазной границы кристалл-расплав на совершенство монокристаллов алюминия», 1980 г.

Белова Нина Васильевна «Влияние условий кристаллизации на совершенство монокристаллов вольфрама и ниобия», 1980 г.

Воронцов Вадим Борисович «Структура монокристаллов сплавов железо-никель, выращенных из расплава», 1980 г.

Порозков Виктор Николаевич «Исследование анизотропии поверхностной энергии и скорости роста ГЦК кристалла методом моделирования на ЭВМ», 1981 г.

Бродова Ирина Григорьевна «Двойниковые дендриты в алюминиевых сплавах», 1982 г.

Насыров Рудольф Шарафович «Влияние условий зонной перекристаллизации на чистоту, структурное совершенство и технологические свойства монокристаллов тугоплавких металлов», 1985 г.

Тарабаев Леонид Павлович «Влияние атомной структуры межфазных границ на механизм и формы роста кристаллов», 1986 г.

Ревун Сергей Алексеевич «Влияние давления инертной газовой среды при направленной кристаллизации расплава на структуру металлов и сплавов», 1986 г.

Поленц Ирина Васильевна «Формирование литой структуры алюминиевых сплавов в различных условиях неравновесной кристаллизации», 1992 г.

Башлыков Денис Владимирович «Влияние различных физических воздействий на структуру и свойства алюминиевых сплавов с тугоплавкими элементами IV группы», 2000 г.

Бродова Ирина Григорьевна «Особенности кристаллизации алюминиевых сплавов в зависимости от состояния их расплавов», 1995 г.

После перевода в 2005 г. группы сотрудников лаборатории кристаллизации в лабораторию интерметаллидов и монокристаллов В.О. Есин, А.С. Кривоносова, В.А. Сазонова, И.Ж. Саттыбаев, Т.Г. Федорова исследовали влияние гравитационного поля и давления на направленную кристаллизацию сплава Al-%Cu. Обнаруженное экстремальное влияние малых давлений на процесс кристаллизации металлических расплавов, приводящее к аномально высокой подвижности межфазной границы, позволяет управлять дендритной ликвацией легирующих компонентов и разделять их в слабых внешних потенциальных полях (гравитационная седиментация) [18]. Результаты этих исследований могут использоваться для глубокой очистки веществ и получения монокристаллов с низкой плотностью ростовых дислокаций.

В работах В.О. Есина, В.И. Данилюка и Л.П. Тарабаева методом компьютерного моделирования исследованы закономерности формирования диссипативных структур при кристаллизации переохлажденных расплавов. Обнаружен морфологический переход, обусловленный сменой диффузионного режима роста на тепловой. Модель позволяет исследовать затвердевание метастабильного расплава в широкой области температур от равновесного ликвидуса до стеклования [19].

На основе теории Энскога-Даймонда Е.П. Романовым и В.Г. Поставаловым разработан новый метод прогнозирования коэффициентов переноса импульса, массы и электрического заряда в высокотемпературных металлических расплавах. В методе использован оригинальный модельный потенциал межчастичного взаимодействия, позволяющий получать расчётные результаты, совпадающие с экспериментальными данными [20].

5. Формирование ультрадисперсных структур различного типа при большой пластической деформации и их деградация при нагреве

Внедрение в Институте в начале 80-х гг. сотрудниками отдела высоких давлений Р.И. Кузнецовым и В.П. Пилюгиным метода деформации «сдвиг под высоким квазигидростатическим давлением» (СПД) [21] положило начало многочисленным исследованиям эволюции структуры металлов и сплавов, подвергнутых большой пластической деформации.

В 1986 г. В.И. Левит с соавторами показали, что в монокристаллах никеля, меди и сплава ХН77ТЮР в результате СПД деформации сформировалась структура, состоящая из сильно разориентированных элементов - микрокристаллитов размером порядка 100 нм, названная субмикрокристаллической, и исследовали закономерности образования такой структуры в материалах с разной энергией дефекта упаковки [22]. Это первая в мировой литературе публикация, содержащая данные по структуре материалов, подвергнутых столь огромным деформациям. По количеству ссылок (313) эту работу, согласно современным наукометрическим критериям, следует отнести к наиболее выдающимся

результатам металлургов ИФМ. Нескрываемый интерес к результатам этого и последующих исследований, проведённых в Институте, проявил Р.З. Валиев, в то время частый гость ИФМ. Через 4–5 лет он, надо отдать ему должное, начал широкую пропаганду применения метода СПД для получения в различных материалах ультрадисперсного структурного состояния. В настоящее время это направление исследований стало одним из приоритетных в мировом научном сообществе.

В последующих работах В.И. Левит, Н.А. Смирнова, М.В. Дегтярев и другие исследовали переориентацию монокристалла в поликристаллический агрегат, показали, что наличие микрокристаллитов в структуре обеспечивает снижение на 150–200 °С температуры рекристаллизации, благодаря тому, что микрокристаллит является готовым зародышем рекристаллизации, и для развития последней не требуется акт термического зарождения, определяющего температуру начала рекристаллизации в умеренно деформированном материале. Такая рекристаллизация была названа низкотемпературной [23]. Также показано, что снижение температуры СПД деформации до 77 К не эффективно для создания дисперсной структуры, так как замедляется разориентация монокристалла и сохраняется структурная неоднородность. Эти результаты в последующие 30 лет многократно повторены другими исследователями.

Сильное снижение температуры рекристаллизации в результате СПД привело В.И. Левита к следующему значительному результату, однако, его значение не только не оценено, прежде всего, сотрудниками ИФМ, он вообще забыт. Этот результат установлен при исследовании рекристаллизации после большой деформации (термин «большая деформация» введён в научный обиход ещё П. Бриджменом, Нобелевским лауреатом и автором метода «сдвиг под давлением»), сопровождающейся распадом пересыщенного твёрдого раствора. В зависимости от условий реализуются разные сценарии явления: рекристаллизация предшествует выделению, выделение предшествует рекристаллизации, процессы развиваются одновременно – это так называемая комплексная реакция распад-рекристаллизация. Были известны две авторитетные, но различные в деталях, точки зрения на схему процесса: Хорнбогена и В.Ф. Суховарова. В.И. Левит с соавторами показал, что форми-



М.В. Дегтярев, В.И. Левит, Н.А. Смирнова

рование структуры из микрокристаллитов сильно изменяет температуру и кинетику рекристаллизации и сравнительно мало влияет на распад. Поэтому реализуется комплексная реакция при ведущей роли рекристаллизации в существенно более низком интервале температур, чем в схемах Суховарова и Хорнбогена [24]. В результате в сплавах с интерметаллидным и карбидным упрочнением формируется структура типа «микродуплекс», в которой в тройных стыках субмикрозёрен (размером около 100 нм) матричной фазы располагаются ещё более мелкие «зерна» гамма штрих фазы или карбидов. Эти результаты вошли в кандидатскую диссертацию Н.А. Смирновой [25] и в докторскую диссертацию В.И. Левита [26]. Дальнейшее развитие это направление нашло в работах М.В. Дегтярева, Т.И. Чашухиной и Л.М. Вороновой.

В зависимости от условий деформации и природы деформируемого материала в нём развиваются такие релаксационные процессы, как деформационное упрочнение (наклёп), динамический возврат, динамическая рекристаллизация, барические фазовые превращения, определяющие механизмы формирования структуры и её термическую стабильность. Метод деформации «сдвиг под давлением» очень удобен для установления закономерностей формирования структуры при реализации различных релаксационных процессов, так как позволяет изменять в широких пределах температуру, давление, степень и скорость деформации. Этот метод приводит к получению закономерно неоднородной структуры относительно центра образца, что затрудняет интерпретацию получаемых результатов. М.В. Дегтяревым с соавторами разработана методика исследования таких образцов, позволившая получить ряд важных выводов. Так, применение рекристаллизационного отжига позволило показать, что неоднородность структуры по радиусу образца сохраняется даже после предельно достижимых деформаций, когда, казалось бы, в деформированном образце ни измерением твёрдости, ни электронно-микроскопическим методом неоднородность структуры не обнаруживается. Рекристаллизация также выявила изменение типа деформационной структуры с увеличением истинной деформации от центра образца к периферии [27].

Предложена эмпирическая формула для расчёта истинной деформации, применение которой позволяет сопоставить данные по структуре и твёрдости, полученные на разных расстояниях от центра образцов, деформированных как с одинаковым, так и с различным углом поворота наковальни [28]. Практическая пригодность этой формулы подтверждена только для деформации, схема которой допускает «вытекание» материала образца из-под наковален, однако она используется многими исследователями и для схемы с боковой поддержкой.

В развитие работ киевской школы металловедов разработана методика определения стадий структурных состояний применительно к сдвигу под давлением. Эта методика основана на ком-

плексном анализе изменения твёрдости, структуры, соотношения типа Холла-Петча, а в случае динамической рекристаллизации – параметра Холломона-Зинера. Показано, что в условиях деформационного наклёпа, реализующихся, например, в железе, конструкционных сталях, молибдене, последовательно сменяются стадии дислокационной ячеистой, смешанной и субмикросталлической (СМК) структуры. Следует подчеркнуть, что термин СМК относится к типу структуры, а не к характерному размеру её элементов. Вопреки бытующему в литературе механистическому выделению особой нанокристаллической структуры, при измельчении элементов СМК структуры до 50–30 нм следующая соответствующая стадия структурного состояния не обнаружена.

Показано изменение вкладов различных механизмов упрочнения в ходе эволюции структуры при СПД: уменьшение дислокационного, дисперсионного и увеличение зернограничного вклада, который становится определяющим при измельчении микрокристаллитов до 50 нм.

Установлены особенности эволюции структуры, обусловленные динамическим возвратом и барическим превращением. Предложена методика выявления и анализа динамической рекристаллизации, обуславливающей принципиально иную стадийность изменения структуры при деформации [29].

Важные результаты получены при исследовании термической стабильности ультрадисперсных структур, сформированных в условиях действия различных релаксационных процессов. Экспериментально подтверждено предположение, сделанное С.С. Гореликом: рекристаллизация однородной изотропной СМК структуры, полученной в чистом однофазном железе привела к формированию субмикрозернистой структуры сотового типа, проявившей в сравнении со структурами других типов наиболее высокую термическую стабильность и устойчивость против вторичной рекристаллизации при нагреве до температуры полиморфного превращения [30].

СМК структура, сформированная в условиях динамического возврата, динамической рекристаллизации и барического превращения, всегда характеризуется низкой термической стабильностью. [31].

Результаты этих исследований опубликованы более чем в 60 статьях, индексируемых в W&S и РИНЦ. Некоторые из них вошли в диссертационные работы Татьяны Игоревны Чашухиной [32], Людмилы Мееровны Вороновой [33] и М.В. Дегтярева [34].

6. Сверхпроводимость

На протяжении более полувека в лаборатории ведутся исследования структуры и фазовых превращений в сверхпроводящих материалах. Потеря электрического сопротивления при переходе в сверхпроводящее состояние с самого момента открытия этого явления привлекает к себе внимание с точки зрения его практи-



С.В. Сударева

ческого использования. В 50-е гг. XX в. актуальным считалось использование сверхпроводящих материалов для создания источников сильных магнитных полей («жестких» сверхпроводников). Перспективы технического применения вызвали интенсивное изучение свойств этих материалов. В отделе начались работы по изучению сверхпроводящих свойств сплавов, в которых возможно выделение дисперсных сверхпроводящих фаз, и установлению влияния пластической деформации и термической обработки на фазовый состав, структуру и сверхпроводящие свойства этих сплавов.

Первая работа в этом направлении проводилась аспирантом лаборатории прецизионных сплавов Е.П. Романовым под руководством В.Д. Садовского и Н.В. Волкенштейна. Исследованы сплавы Zr–Nb, в которых Nb обеспечивает сверхпроводимость при температуре выше температуры кипения гелия (4,2 К). Возможности лаборатории позволили аспиранту Романову самостоятельно получить такие сплавы. Образцы выплавляли как в дуговой печи, так и на специально созданной лабораторной электронно-лучевой установке. При исследовании распада пересыщенного твердого раствора показано, что система выделившихся дисперсных частиц сверхпроводящей фазы пропускает сверхпроводящий ток, хотя матрица сплава находится в не сверхпроводящем состоянии. Установлено влияние размера сверхпроводящих частиц на критическую температуру перехода системы в сверхпроводящее состояние, и определены режимы эвтектоидного распада, обеспечивающие свойства присущие «жестким» сверхпроводникам. Эти результаты вошли в кандидатскую диссертацию Е.П. Романова «Исследование сплава с дисперсной сверхпроводящей фазой» (1966 г.).

В СССР, а затем в России разработку промышленной технологии получения сверхпроводящих материалов с 60-х гг. XX в. ведёт ВНИИНМ имени А.А. Бочвара (г. Москва). Несравненно более высокие технологические возможности ВНИИНМ по сравнению с ИФМ обусловили целесообразность совместных работ. С 1975 года в лаборатории проводятся исследования структуры сверхпроводящих композитов на основе интерметаллических соединений V_3Ga и Nb_3Sn , полученных во ВНИИНМ. Над исследованием тонкой структуры новых сверхпроводящих интерметаллидов и установлением взаимосвязи между структурой сверхпроводящей фазы и токовыми характеристиками провода под руководством Е.П. Романова и С.В. Сударевой работали Е.Н. Попова, Т.П. Криницина и Л.А. Родионова, Л.В. Буданова, Н.В. Николаева. Позднее к работе по этому направлению присоединилась И.Л. Дерягина. Исследованы как материалы, входящие в композит (бронза, медь, ниобий) и сверхпроводящая фаза A15, так и различные конструкции многоволоконных композитов, изготовленных по технологиям «внутреннего источника олова» и «бронзовой».



Л.В. Буданова

На основании результатов этих исследований внесены предложения по изменению технологии изготовления композитов с целью повышения их свойств. Так, решена следующая важная технологическая задача. Получение хороших сверхпроводящих свойств требует использования бронзы с наиболее высоким содержанием олова, но даже при его содержании 8,5–10 % сплавы охрупчивались, что препятствовало их использованию. Естественное старение ещё более усиливало хрупкость. При изучении высокооловянистых бронз (свободной и матричной) установлены: механизм деформации, закономерности старения и особенности структуры бронз, полученных по разным технологиям – дуплекс-плавкой и Оспрей-методом. Оказалось, что причинами растрескивания бронзовой матрицы является двойникование при холодной деформации с образованием по границам двойников пластин хрупкой ϵ -фазы и химическая неоднородность бронзы, из-за чего локальное содержание олова может существенно превысить среднее. Найдено технологическое решение, обеспечивающее равномерное распределение олова в бронзовой матрице, позволившее предотвратить развитие хрупкости последней при повышении содержания олова до 15 %.

При корректировке технологии учтены предложения ИФМ – тёплая деформация и использование Оспрей-бронзы с повышенным содержанием олова (14,5–15 %). Установлен механизм влияния легирующих элементов (Mg, Zn, Zr, Ti, Hf и др.) на плотность критического тока j_c . Выявлен способ легирования, обеспечивающий наиболее благоприятную морфологию сверхпроводящих слоёв. Производителем приняты рекомендации по количеству и способу введения титана, а также укороченный двухступенчатый режим диффузионного отжига для проводов на основе Nb_3Sn по проекту ИТЭР, плакированных Cr. На первой, низкотемпературной ступени отжига образуется высокая плотность зародышей сверхпроводящей фазы, а на второй ступени, при более высокой температуре – рост слоя сверхпроводящей фазы с образованием мелкозернистой структуры.

Установлена корреляция между режимами отжига, геометрией Nb-волокон, структурой слоя Nb_3Sn и токовыми характеристиками. Оптимизация этих параметров привела к повышению критического тока на 20–25 %. Результатом этой совместной работы явилось создание длинномерных многоволоконных низкотемпературных сверхпроводящих композитов на основе Nb_3Sn с $j_c > 1000 \text{ A/mm}^2$, которые используются, в частности, в качестве обмотки сверхпроводящего магнита Интернационального термоядерного экспериментального реактора (г. Кадараш, Франция). Существенным конкурентным преимуществом перед зарубежными аналогами технологии, разработанной ВНИИНМ при участии ИФМ УрО РАН, явилась более медленная деградация структуры и сверхпроводящих свойств композита при его эксплуатации.

Основные результаты этих исследований вошли в кандидатские диссертации Е.Н. Поповой «Электронно-микроскопическое исследование структуры композиционных материалов с соединениями A_3B с целью улучшения их технологических и сверхпроводящих характеристик» (1988 г.), Т.П. Кринициной «Исследование тонкой структурной сверхпроводящих слоёв V_3Ga в легированных композиционных сверхпроводниках и бронзовой матрицы в композитах $Nb-Cu-Sn$ с целью повышения токонесущей способности и технологических характеристик» (1989 г.) и Л.А. Родионовой «Влияние легирования на механизм образования сверхпроводящих слоёв, тонкую структуру и свойства композитов на основе Nb_3Sn и V_3Ga » (1992 г.), докторские диссертации Е.П. Романова «Влияние фазовых превращений на электрофизические свойства сверхпроводящих соединений со структурами перовскита, А-15 и С-15» (1990 г.), Е.Н. Поповой «Структура и свойства сверхпроводящих композиционных материалов на основе соединений A_3B и высокопрочных композитов $Cu-Nb$ » (2009 г.) и монографию [35].

В лаборатории всегда уделялось большое внимание работе со студентами вузов. Целый ряд курсовых и дипломных работ по материаловедению сверхпроводников были успешно защищены «подопечными» этого коллектива. Некоторые выпускники (Ю.В. Блинова, Е.Г. Валова-Захаревская) по окончании университета поступили в аспирантуру ИФМ, выбрав в качестве своих научных исследований материаловедение сверхпроводящих композитов.

С открытием в 1986 г. высокотемпературной сверхпроводимости сотрудники лаборатории активно включились в работу по синтезу и исследованию новых ВТСП материалов. Исследованиями руководили Е.П. Романов, С.В. Сударева и И.Б. Бобылев. Под руководством И.Б. Бобылева (М.Г. Любимов, В.Г. Морычева, Е. Шавкунова, Е.И. Кузнецова, Н.А. Зюзева, И.Л. Дерягина) успешно синтезированы монокристаллы $YBaCuO$ с различным содержанием кислорода, исследовано влияние на сверхпроводящие свойства замещений иттрия и бария другими химическими элементами, синтезирована висмутовая ВТСП керамика (2212 и 2223 фазы), исследована её способность к стеклованию и разработана технология получения литых ВТСП цилиндров с высоким уровнем защиты от магнитного поля. Группа исследователей под руководством С.В. Сударевой (Е.И. Кузнецова, И.Л. Дерягина, Т.П. Криницина, Ю.В. Блинова) сосредоточилась на исследовании ВТСП керамики $YBaCuO$ и ВТСП-композитов на основе Bi -керамики в Ag -оболочке, производимых во ВНИИНМ.

Обнаружено, что в монокристаллах $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ при отклонении от стехиометрии по кислороду соединение 123 теряет стабильность и при 200 °С расслаивается на две фазы с различным содержанием кислорода. Под влиянием паров воды происходит разупорядочение тяжёлых атомов Y , Ba , Ba , Y , образование ку-

бической фазы и падение диамагнитного отклика. Такой распад происходит и в результате естественного старения. И.Б. Бобылевым и Н.А. Зюзевой построена экспериментальная диаграмма состояний $YBa_2Cu_3O_6 - YBa_2Cu_3O_7$ и показано влияние атмосферы низкотемпературного отжига на интенсивность распада. Легирование нестехиометрического соединения $YBaCuO$ церием и празеодимом и частичное замещение любого из основных элементов на Sr , Nd , Eu повышает устойчивость соединений типа 123 по отношению к распаду. Для восстановления структуры $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ после низкотемпературного распада требуется отжиг при 930–950 °С. Такой отжиг продолжительностью 1–2 ч позволяет сохранить значительное количество возникших в ходе распада дефектов структуры, которые способны осуществлять пиннинг магнитных вихрей, обеспечивая существенное повышение критической плотности тока в магнитных полях выше 2 Тл, по сравнению с керамикой, полученной по стандартной технологии.

Исследование композитов Bi -керамика/ Ag показало проникновение Ag в керамику и выявило его влияние на сверхпроводящие характеристики. Также установлено существование двух механизмов образования фазы 2223 из прекурсора – жидкостного и диффузионного.

По результатам исследований защищены кандидатские диссертации Е.И. Кузнецовой «Модулированные структуры, переходные явления и свойства металлических сплавов ($Ni-Al$) и оксидов $Y(Eu)-Ba-Si-O$ » (2003 г.), Ю.В. Блиновой «Фазовые превращения и тонкая структура ВТСП-материалов» (2006 г.) и И.Л. Дерягиной «Влияние кислородной нестехиометрии, условий термообработки и замещений элементов на электрофизические свойства сверхпроводящих фаз $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8-\delta}$ » (2007 г.). Основные результаты исследования сверхпроводящих материалов вошли в монографию [35].

Установлено, что образование фазы MgB_2 при температурах 900–1000 °С происходит, в основном, с помощью жидкостного механизма, когда твёрдый бор растворяется в расплавленном магнии с образованием дендритоподобной структуры из плотных и рыхлых областей. Средняя плотность получившегося материала составляет половину теоретической. Критическая плотность тока ($2-5 \times 10^4$ А/см²) определяется объёмной сеткой из плотных областей. В настоящее время в лаборатории проводится поиск технологических приёмов, позволяющих повысить плотность соединения MgB_2 .

7. Текстурованные эпитаксиальные ленты-подложки для сверхпроводящих кабелей 2-го поколения

Окридской национальной лабораторией США (ORNL) в 1996 г. предложено использовать биаксиально текстурованную нике-



Ю.В. Блинова

левую ленту в качестве подложек в архитектуре многослойных сверхпроводников второго поколения (2G HTSC). Затем в промышленных условиях налажено производство многокилометрового кабеля 2G HTSC на подложке из сплава Ni–5% W. Ведётся активный поиск альтернативы данному сплаву.

В Институте с 1998 г. Д.П. Родионовым, И.В. Гервасевой и Ю.В. Хлебниковой (позднее ещё Л.Ю. Егоровой и Т.Р. Суаридзе) проводятся работы по изучению эволюции текстуры деформации и первичной рекристаллизации в тонких лентах из двойных и тройных сплавов на основе никеля с элементами VB, VIB, VIIB и VIIIB групп периодической системы (Nb, W, Re, Mo, V, Mn, Al, Cr, Pd). Установлена взаимосвязь между типом текстуры готовой ленты и компонентным составом текстуры деформации. Определены пределы легирования, определяющиеся величиной концентрационного расширения кристаллической решётки, позволяющие получать ленту с кубической текстурой $\{100\}\langle 001\rangle$, близкой к монокристаллической, и улучшенными прочностными свойствами, в несколько раз превышающими свойства чистого никеля. По отработанным в группе Родионова технологиям выплавки, получения заготовок и холодной прокатки на заводе ОЦМ получены ленты сплавов Ni–Cr и Ni–V длиной до 15 м. На эти ленты осуществлено нанесение буферных и сверхпроводящего слоёв методами МОСVD (Химфак МГУ), лазерной абляции (Польша) и электронно-лучевого напыления (ИФМ УрО РАН). Способ получения текстурованной ленты из сплавов Ni–Re запатентован [36].

Необходимость повышения критического тока в ВТСП композите привела к созданию немагнитных лент-подложек. Предложены составы немагнитных тройных сплавов Ni–Cr–W. Замена части вольфрама в двойном сплаве хромом так, чтобы количество вольфрама не превышало 3 ат.%, приводит к требуемому изменению магнитной природы сплава, сохраняя высокие прочностные свойства ленты ($\sigma_{0,2}$ – около 150–160 МПа) и совершенную кубическую текстуру.

Определены режимы отжига, позволяющие получить после деформации прокаткой со степенями 98–99 % совершенную кубическую текстуру, близкую к монокристаллической, и получены текстурованные ленты из промышленного сплава Ni₅₀Fe₅₀, пригодные для эпитаксиального нанесения ВТСП.

Изучены процессы формирования текстуры рекристаллизации в трёхслойной композитной Ni–4,8% W/Ni–11% Cr/Ni–4,8% W ленте. Использование в качестве среднего слоя парамагнитного сплава Ni–11% Cr позволяет снизить удельную намагниченность всего композита на ~15 %. Результаты исследований по созданию текстурованных подложек из сплавов на основе никеля обобщены в монографии [37].

Исследован процесс текстурообразования в ряде бинарных и тройных медных сплавов. Использование в архитектуре мно-

гослойных сверхпроводников 2G HTSC текстурованной медной ленты вместо никелевой имеет ряд преимуществ, так как медь немагнитна и значительно дешевле никеля. Легирование 3d-переходными элементами, такими как Cr, V и Fe, приводит к упрочнению бинарных медных сплавов за счёт выделения дисперсных частиц чистого легирующего элемента, а тройных сплавов на медно-никелевой основе – за счёт аддитивного вклада в твёрдорастворное упрочнение никеля и 3d-металла. При сохранении немагнитности и остроты кубической текстуры предел текучести лент из медных сплавов в 2,5–4,5 раза выше, чем лент из чистой меди. На способ изготовления биаксиально текстурованных подложек из тройных сплавов на медно-никелевой основе, легированных Cr, V и Fe получен патент [38].

Впервые исследована склонность к окислению лент-подложек из двойных и тройных сплавов на основе меди с V, Cr и Fe. Установлено, что ленты из сплавов Cu–40%Ni–1,2%Cr и Cu–40%Ni–1,4%Fe, помимо совершенной кубической текстуры и высоких прочностных свойств, обладают существенно лучшими антикоррозионными свойствами при температуре 700 °С, чем ленты из чистой меди и остальных исследованных сплавов, и перспективны в качестве подложек для эпитаксиального нанесения буферных и сверхпроводящих слоёв при повышенных температурах.



Сидят: С.В. Сударева, В.О. Есин, Д.П. Родионов, Е.А. Фокина, Е.П. Романов, М.В. Дегтярев, Ю.Н. Акшенцев, Т.Г. Федорова, А.С. Кривоносова. Стоят: И.Б. Бобылев, Т.И. Чашухина, Л.М. Воронова, Т.П. Криницина, Е.Н. Попова, А.Б. Кутын, И.Л. Дерягина, Е.Г. Валова-Захаревская, Н.А. Зюзева, Д.И. Давыдов, Е.И. Кузнецова, Ю.Г. Красноперова, Н.Н. Степанова, Д.К. Орлова

8. Упрочнённые композиты

Токовые характеристики многоволоконных стрендов на основе сверхпроводящего соединения Nb_3Sn крайне чувствительны к уровню напряжений, возникающих в проводе в процессе эксплуатации. Дegrадации критического тока под действием напряжений можно избежать, упрочнив медную оболочку стренда, например, с помощью сплава $Cu-Nb$, обладающего не только высокой прочностью, но и высокой электропроводностью. Композиты $Cu-Nb$ могут использоваться и как технические провода высокой прочности. На образцах композитов $Cu-Nb$, разработанных во ВНИИНМ, сотрудники отдела прецизионных сплавов, исследуя эволюцию структуры вследствие деформации и отжига, определили влияние структурных характеристик сплава на его прочность, установили границы термической стабильности композита, что немаловажно для оценки условий его практического применения. Также установлено, что легирование титаном предпочтительнее, чем легирование цирконием, поскольку не вызывает охрупчивания композита. Результаты исследований использованы при разработке во ВНИИНМ проводов на основе $Cu-Nb$ с пределом прочности при комнатной температуре 1100–1250 МПа и электропроводностью 70 % от международного стандарта для высокочистой меди, а при 77 К эти параметры составляют 1350–1450 МПа и 325 %, соответственно. Такие провода перспективны для создания нового класса сверхпроводящих магнитов, например в ЯМР установках, рассчитанных на уровень магнитного поля 20 Тл и частоту до 1 ГГц, а также для повышения надёжности крупных магнитных систем. В частности провод на основе композита $Cu-18Nb$, разработанный во ВНИИНМ, успешно используется в работе импульсного магнита с полем 100 Тл в лаборатории высоких полей (США).

9. Исследование исторического металла

Как известно, все выдающиеся металлореды со времен П.А. Аносова не могут пройти мимо тайны булата. Не миновала сия чаша и сотрудников ИФМ, одним из которых явился Д.П. Родионов. Попутно он принимает участие в исследованиях с применением современных методов физического металловедения других сортов исторического железа [39–40].

Ю.Н. Акшенцев, М.В. Дегтярев, В.О. Есин

Список литературы

1. Научный архив УрО РАН. Ф.2. Оп. 1. Д. 34. Л 16. Подлинник № 20.
2. Научный архив УрО РАН. Копия № 27.
3. В.Д. Садовский, *МирТОМ*, № 11, 48 (1983).
4. Д.П. Родионов, В.Д. Садовский, Л.В. Смирнов, В.М. Счастливцев, *ФММ* **33**, 621 (1972).

5. В.Д. Садовский, Л.В. Смирнов, Д.П. Родионов, А.Р. Коэмец, *ФММ* **38**, 1083 (1974).
6. М.Г. Гайдуков, Д.П. Родионов, Л.В. Смирнов, Н.М. Щербакова, *ФММ* **54**, 174 (1982).
7. В.Д. Садовский, Н.Н. Сюткина, Д.П. Родионов, Л.В. Смирнов, *ФММ* **56**, 618 (1983).
8. Д.П. Родионов, В.М. Счастливцев, *Стальные монокристаллы*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (1996), 273 с.
9. Н.Д. Бахтеева, В.И. Левит, В.А. Сазонова, *ФММ* **56**, 807 (1983).
10. В.И. Левит, Н.А. Смирнова, Л.С. Давыдова, *ФММ* **68**, 334 (1989).
11. Л.В. Смирнов, Е.Н. Соколов, В.Д. Садовский, *ДАН СССР* **103**, 609 (1955).
12. Л.С. Давыдова, М.В. Дегтярев, В.И. Левит, Н.А. Смирнова, *ФММ* **60**, 344 (1985).
13. А.Ю. Калетин, Дисс... канд. техн. наук, ИФМ УрО АН СССР, Свердловск (1985).
14. М.А. Кривоглаз, В.Д. Садовский, Л.В. Смирнов, Е.А. Фокина, *Закалка стали в магнитном поле*, Наука, Москва (1977), 120 с.
15. В.М. Счастливцев, Ю.В. Калетина, Е.А. Фокина, *Мартенситное превращение в магнитном поле*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2007), 486 с.
16. В.Д. Садовский, Е.А. Фокина, *Остаточный аустенит в закаленной стали*, Наука, Москва (1986), 112 с.
17. В.М. Счастливцев, Ю.В. Калетина, Е.А. Фокина, *Остаточный аустенит в легированных сталях*, РИО УрО РАН, Екатеринбург (2014), 354 с.
18. В.О. Есин, А.С. Кривоносова, И.Ж. Саттыбаев, Т.Г. Федорова, В.А. Сазонова, *ФММ* **107**, 631 (2009).
19. Л.П. Тарабаев, В.О. Есин, *Металлы*, № 6, 40 (2007).
20. В.Г. Постовалов, Е.П. Романов, В.П. Кондратьев, *ФММ* **107**, 3 (2009).
21. Р.И. Кузнецов, В.И. Быков, В.П. Чернышев, В.П. Пилюгин, Н.А. Ефремов, А.В. Пашеев, Препринт ИФМ УНЦ АН СССР № 4/85 (1985).
22. Н.А. Смирнова, В.И. Левит, В.П. Пилюгин, Р.И. Кузнецов, Л.С. Давыдова, В.А. Сазонова, *ФММ* **61**, 1170 (1986).
23. Н.А. Смирнова, В.И. Левит, В.П. Пилюгин, Р.И. Кузнецов, М.В. Дегтярев, *ФММ* **62**, 566 (1986).
24. Л.М. Воронова, В.И. Левит, Н.А. Смирнова, *ФММ*, № 4, 109 (1990).
25. Н.А. Смирнова, Дисс... канд. физ.-мат. наук. ИФМ УрО АН СССР, Свердловск (1988).
26. В.И. Левит, Дисс... докт. физ.-мат. наук. ИФМ УНЦ АН СССР, Свердловск (1987).
27. М.В. Дегтярев, Л.М. Воронова, Т.И. Чашухина, *ФММ* **99**, 58 (2005).
28. М.В. Дегтярев, Т.И. Чашухина, Л.М. Воронова, Л.С. Давыдова, В.П. Пилюгин, *ФММ* **90**, 83 (2000).
29. М.В. Degtyarev, T.I. Chashchukhina, L.M. Voronova, A.M. Patselov, V.P. Pilyugin, *Acta Mater.* **55**, 6039 (2007).
30. Л.М. Воронова, М.В. Дегтярев, Т.И. Чашухина, *ФММ* **104**, 275 (2007).
31. Т.И. Чашухина, Л.М. Воронова, М.В. Дегтярев, *Изв. РАН. Сер. физич.* **71**, 285 (2007).
32. Т.И. Чашухина, Дисс. ... канд. техн. наук, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург (1999).
33. Л.М. Воронова, Дисс. ... канд. техн. наук, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург (2004).

34. М.В. Дегтярев, Дисс. ... докт. техн. наук, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург (2005).
35. Е.П. Романов, С.В. Сударева, Е.Н. Попова, Т.П. Креницина, *Низкотемпературные и высокотемпературные сверхпроводники и композиты на их основе*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2009), 516 с.
36. Д.П. Родионов, И.В. Гервасьева, Ю.В. Хлебникова, Пат. РФ № 451766С1 (2012).
37. Д.П. Родионов, И.В. Гервасьева, Ю.В. Хлебникова, *Текстурированные подложки из никелевых сплавов*, РИО УрО РАН, Екатеринбург (2012), 112 с.
38. Д.П. Родионов, Ю.Н. Акшенцев, И.В. Гервасьева, Ю.В. Хлебникова, Т.Р. Суаридзе, Пат. РФ № 2624564 (2017).
39. В.М. Счастливцев, В.Ю. Герасимов, Д.П. Родионов, ФММ **106**, 182 (2008).
40. Д.П. Родионов, В.М. Счастливцев, Ю.В. Хлебникова, ФММ **108**, 105 (2009).

ЛАБОРАТОРИЯ

прочности

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Волков Алексей Юрьевич, заведующий лабораторией, д.т.н.
- Александров Анатолий Валентинович, ведущий технолог
- Антонова Ольга Владимировна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Каменецкий Борис Исаакович, ведущий научный сотрудник, к.т.н.
- Карькина Лидия Евгеньевна, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор
- Кесарев Александр Геннадьевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Комкова Дарья Аркадьевна, ведущий инженер
- Кондратьев Владимир Васильевич, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор
- Костина Алина Евгеньевна, инженер-исследователь
- Кругликов Николай Александрович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Ломаев Илья Леонидович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Новикова Оксана Сергеевна, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Орлов Станислав Юрьевич, старший лаборант
- Петрик Михаил Владимирович, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Соколов Александр Леонидович, ведущий технолог
- Яковенкова Людмила Ивановна, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ прочности

Лаборатория прочности ИФМ УрО РАН была создана в 2009 г. на базе лаборатории теории прочности, которую с момента основания (1989 г.) возглавляла доктор физико-математических наук, профессор Гринберг Элла Александровна. В состав новой лаборатории вошли почти все сотрудники лаборатории теории прочности, часть сотрудников бывшего отдела высоких давлений, а также лаборатории механических свойств.

Научное направление деятельности лаборатории прочности: «Формирование микроструктуры, физико-механических и функциональных свойств интерметаллидов, упорядоченных сплавов и чистых металлов под влиянием интенсивных деформационных воздействий: от разработки теоретических подходов до создания новых материалов».

По состоянию на начало 2017 г. в лаборатории работает 17 человек, из которых – 4 доктора наук и 7 кандидатов наук. Лаборатория оснащена мощным технологическим оборудованием: двумя гидравлическими прессами (усилием 10000 кН и 4000 кН), станочным парком и печами. В ней также имеется уникальное оборудование: гидростат для компактирования изделий из порошковых материалов высоким гидростатическим давлением (до 250 МПа); для гидроэкструзии хрупких и малопластичных материалов используется лабораторная установка М-20 (до 1200 МПа), возможен подогрев образцов до 250 °С.

В целом, историю лаборатории прочности следует вести с 1968 г., когда в институте была создана лаборатория гидроэкструзии. Появление этого, нового для ИФМ, направления по обработке различных материалов в условиях всестороннего сжатия, было обусловлено активными мировыми исследованиями

и успешными разработками в области физики и техники высоких давлений. Лидером исследований в этой области был обладатель Нобелевской премии по физике за 1946 г. американский физик Перси Бриджмен. Исследования, выполненные П. Бриджменом по изучению влияния высоких давлений на полиморфные превращения в твёрдых телах, изменений их электрических и механических свойств, а также его работы по созданию аппаратуры высокого давления, вызвали большой интерес во многих странах мира. В результате этих работ удалось получить синтетический алмаз, что привело к достижению большого экономического эффекта.

В Советском Союзе под руководством академика Леонида Фёдоровича Верещагина, основателя Института физики высоких давлений АН СССР, активно развивались исследования и разработки по созданию аппаратуры высокого давления, изучению фазовых превращений под давлением, синтезу новых материалов и исследованиям электрических, магнитных и механических свойств твёрдых тел.

В Институте физики металлов, в лаборатории высоких давлений под руководством доктора физико-математических наук Кузьмы Петровича Родионова проводились исследования в области физики высоких давлений. Важной задачей лаборатории была разработка аппаратуры высокого давления. Эту задачу очень успешно выполнял инженер-конструктор Борис Иванович Береснев, который после окончания в 1952 г. Московского института химического машиностроения был направлен на работу в конструкторский отдел Института физики металлов.

Академик Сергей Васильевич Вонсовский, будучи теоретиком, интересовался прогрессом в области экспериментальной физики и, в частности, физики высоких давлений. Он тесно сотрудничал с Л.Ф. Верещагиным и поддерживал контакты сотрудников лаборатории высоких давлений ИФМ с Институтом физики высоких давлений. В один из визитов в Институт физики металлов Л.Ф. Верещагин пригласил молодого и способного конструктора Б.И. Береснева к себе в аспирантуру. В 1953 г. Б.И. Береснев поступает в аспирантуру к Л.Ф. Верещагину. После учёбы в аспирантуре в 1953–1957 гг., Б.И. Береснев работает в Институте физики высоких давлений и в 1960 г. защищает кандидатскую диссертацию.

В 1952 г. в США и Великобритании была издана книга П. Бриджмена «Исследования больших пластических деформаций и разрыва» (в СССР эта книга была переиздана в 1955 г. [1]). В монографии П. Бриджмена были рассмотрены результаты исследований влияния высокого давления на прочность и пластичность ряда конструкционных сталей и других сплавов, а также приведены новые способы испытания и обработки материалов под высоким давлением. П. Бриджмен впервые установил, что пластичность обычных сталей сильно возрастает, если исследуемые образцы растягиваются в жидкости, находящейся под давлением

2500–3000 МПа. Установленные Бриджменом эффекты повышения пластичности и прочности материалов в условиях растяжения при высоких гидростатических давлениях и предложенная им линейная зависимость прочности и пластичности от внешнего давления вызвали большой интерес у исследователей в различных странах.

Б.И. Бересневым под руководством академика Л.Ф. Верещагина были выполнены эксперименты по растяжению образцов под высоким давлением и показано, что для ряда металлов и сплавов можно достигнуть значительного повышения пластичности за счёт воздействия давления и температуры в диапазоне 200–250 °С.

В период 1955–1959 гг. во всем мире проводились эксперименты по выдавливанию медных и стальных заготовок жидкостью высокого давления. Позднее английским профессором Х. Пью этот метод был назван гидроэкструзией. П. Бриджмен ограничился относительно небольшим количеством опытов, в которых столкнулся с проблемами неконтролируемого истечения металла, больших термических эффектов и разрушения материала при истечении из очага матрицы. Почти одновременно с Х. Пью и независимо от него, коллективом сотрудников Института физики высоких давлений АН СССР с участием Б.И. Береснева проводились работы по гидроэкструзии широкого класса материалов, с целью изготовления точных заготовок различных изделий.

Б.И. Береснев разработал установку для гидроэкструзии металлов до давлений 1000 МПа. В этой установке давление жидкости создавалось с помощью гидрокомпрессора. В серии экспериментов по гидроэкструзии меди, алюминия и его сплавов, а также малоуглеродистых сталей, были установлены параметры, определяющие оптимальные условия осуществления процесса. Укажем эти параметры: тип рабочей жидкости и её сжимаемость под давлением, вид смазки и покрытия поверхности заготовок, угол конуса матрицы, степень деформации материала заготовки и соотношение объёма жидкости в контейнере с объёмом заготовки. Б.И. Береснев первый в СССР осуществил эти исследования и показал перспективность метода гидроэкструзии. Эти результаты были опубликованы исследователями в работе [2]. Эта монография вызвала большой интерес у научных работников СССР и учёных за рубежом и в 1963 г. была издана на английском языке.

В 1961 г. Б.И. Береснев поступил на работу в Институт физики земли АН СССР, где он проводил эксперименты по осадке под давлением образцов некоторых горных пород, отличающихся как минералогическим составом, так структурным строением. В этот период времени он тесно сотрудничал с лабораторией высоких давлений ИФМ. Был создан творческий коллектив в составе учёных Института физики земли АН СССР и сотрудников ИФМ.

Этот коллектив выполнил оригинальные исследования по трём основным направлениям:

1. Разработка аппаратуры высокого давления и методик изучения физико-механических свойств материалов под давлением.

2. Исследование прочности, пластичности и разрушения твёрдых тел непосредственно в условиях высокого давления.

3. Изучение влияния предварительной деформации под высоким давлением на изменение физико-механических свойств твёрдых тел.

В результате проведённых экспериментов этим коллективом была создана установка высокого давления М-20, позволяющая осуществлять следующие методики: растяжение и сжатие металлических образцов при постоянном давлении, испытания на ползучесть и выполнение процессов гидроэкструзии различных металлов и сплавов. Благодаря наличию двух мультипликаторов, гидрорентгеновского и системы заполнения контейнера от насосов, можно было выполнять различные методики обработки до давлений 2000 МПа в интервале температур 20–250 °С. Подобных установок в этот период (1960–1968 гг.) не имелось ни в СССР, ни за рубежом. Лабораторная установка М-20 до сих пор находится

в рабочем состоянии и используется в лаборатории прочности для гидроэкструзии различных металлов, сплавов и композитов, а также для гидростатического прессования изделий из тонкодисперсных порошков.

Были проведены обширные исследования по выявлению влияния высокого давления на пластичность различных металлов и сплавов. Впервые осуществлялись эксперименты по растяжению и сжатию под давлением хрупких металлов, интерметаллидов, полупроводников и других материалов. Большой интерес у научной общественности вызвали исследования по влиянию давления на зарождение и развитие микродефектов и трещин разрушения, а также на заживление пор и трещин при деформации металлов под давлением.

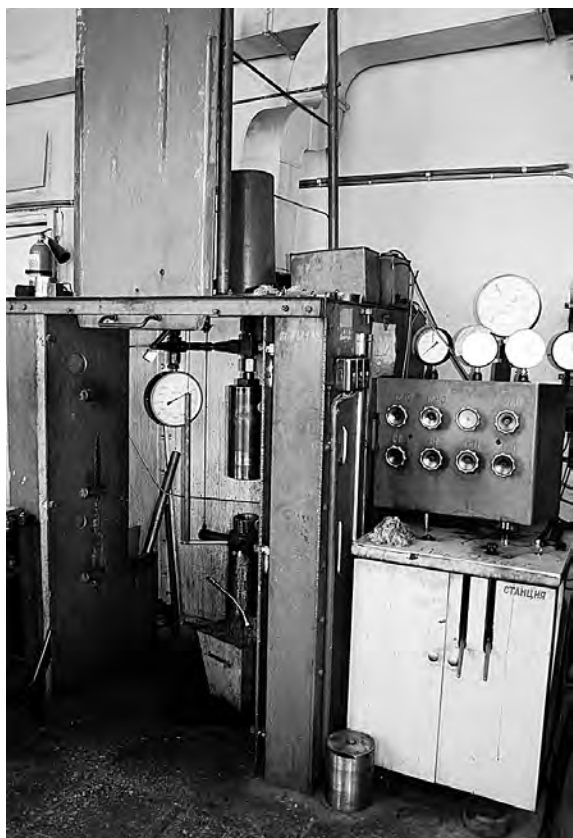
Сотрудниками ИФМ был выполнен большой объём исследований по изучению влияния предварительной деформации под высоким давлением на остаточные свойства различных металлов и сплавов. Обширные исследования, проведённые с молибденом и его сплавами, показали,

что после гидроэкструзии наблюдается значительное повышение прочности (в 2–3 раза), многократное увеличение пластичности и ударной вязкости. Серия экспериментов по гидроэкструзии ряда других тугоплавких металлов: хрома, титана, бериллия и ниобия, также привела к заметному повышению их механических свойств. При изучении физической природы влияния деформации под давлением на остаточные свойства металлов и сплавов выполнялись микроструктурные, рентгеновские электронно-микроскопические исследования и изучение текстуры. Итогом работы явился выпуск монографии [3], ответственным редактором которой был академик С.В. Вонсовский.

С.В. Вонсовский был в это время председателем Уральского Научного Центра АН СССР и заместителем директора по науке Института физики металлов. Сергей Васильевич предложил Б.И. Бересневу перейти на работу в ИФМ, чтобы организовать и возглавить лабораторию гидроэкструзии. С.В. Вонсовский также предложил Б.И. Бересневу выступить с докладом о развитии и перспективах научных исследований по этой тематике на Президиуме Отделения общей физики и астрономии АН СССР.

Доклад Б.И. Береснева был одобрен, и Президиум АН СССР принял решение о развитии работ по гидроэкструзии в Институте физики металлов УНЦ АН СССР. В решении Президиума АН СССР предусматривались следующие мероприятия: строительство корпуса гидроэкструзии в ИФМ, выделение фондов на оборудование и материалы, а также дополнительное финансирование для привлечения научных работников, инженеров и рабочих. Решением Учёного совета института Б.И. Береснев был избран заведующим лабораторией гидроэкструзии. В это время он проявил себя не только как известный учёный, возглавивший разработку и внедрение новых технологических процессов по гидростатической обработке материалов, но и как умелый организатор научных исследований. К моменту готовности к эксплуатации корпуса гидроэкструзии были закуплены токарные, фрезерные и шлифовальные станки, печи для термической обработки деталей, гидравлический пресс усилием 4000 кН, а также научное оборудование для структурных и рентгеновских исследований. В лаборатории была организована специализированная мастерская с квалифицированными рабочими и механиками по изготовлению и эксплуатации установок высокого давления.

В период с 1972 по 1978 гг. Б.И. Береснев большое внимание уделял работам по созданию опытно-промышленных установок и технологий гидроэкструзии заготовок из конструкционных сталей и сплавов цветных металлов. Целью этих исследований и разработок являлось получение точных шлицевых профилей из сталей 40Х и сплавов АМЦ методом полунепрерывной, гидромеханической гидроэкструзии, вместо существующих технологий механообработки методами чернового и чистового фрезерования. На базе прессы



Лабораторная установка высокого давления М-20

усилием 4000 кН были разработаны установки для гидроэкструзии профилей и созданы опытно-промышленные технологии, которые обеспечивали повышение производительности в 3-5 раз и снижение расхода металла на 25–40%. Эти работы проводились по хозяйственным договорам с рядом отраслевых институтов и промышленных предприятий, а также по программам ГКНТ СМ СССР.

По инициативе Б.И. Береснева были разработаны оригинальные установки (гидростаты), которые использовались для обработки изделий из порошков жидкостью высокого давления с целью повышения плотности перед спеканием и изготовления специальных заготовок различных форм. В 1978 г. сотрудник лаборатории Б.И. Каменецкий демонстрировал гидростат на выставке «Достижения советской науки и техники» в городе Варшава. После выставки в Варшаве польская фирма «Унитра» оформила контракт на изготовление и покупку гидростата у Института физики металлов. В 1984 г. гидростат ИФМ демонстрировался на Лейпцигской ярмарке, где получил золотую медаль. На площадях ИФМ было изготовлено несколько десятков таких гидростатов для институтов

академии наук и предприятий СССР. На конструкцию гидростата получено авторское свидетельство [4].

Важным направлением, которое предложил Б.И. Береснев, являлось создание процесса гидроэкструзии толстостенных заготовок с отверстиями малых диаметров большой длины, которые используются для изготовления ответственных изделий. По существующей в то время технологии отверстия малых диаметров изготавливали методом глубокого сверления на специальных станках. Процесс глубокого сверления был трудоемким, занимал большое время и сопровождался значительным браком из-за поломки сверл. В институте были выполнены исследования по созданию оригинального метода гидроэкструзии, который позволяет ликвидировать глубокое сверление и улучшить комплекс механических свойств заготовок после деформации и последующей термической обработки по специальным режимам.

Опытная партия заготовок была передана заказчику для изготовления ответственных изделий, которые при



Гидравлический пресс усилием 4000 кН

натурных испытаниях показали очень высокие эксплуатационные свойства. Данная работа получила высокую оценку Президента академии наук академика А.П. Александрова. После ознакомления с результатами этой работы А.П. Александров оказал содействие в получении дополнительного финансирования этих работ и изготовления сверх плана гидравлического пресса усилием 10000 кН на Днепропетровском заводе прессов.

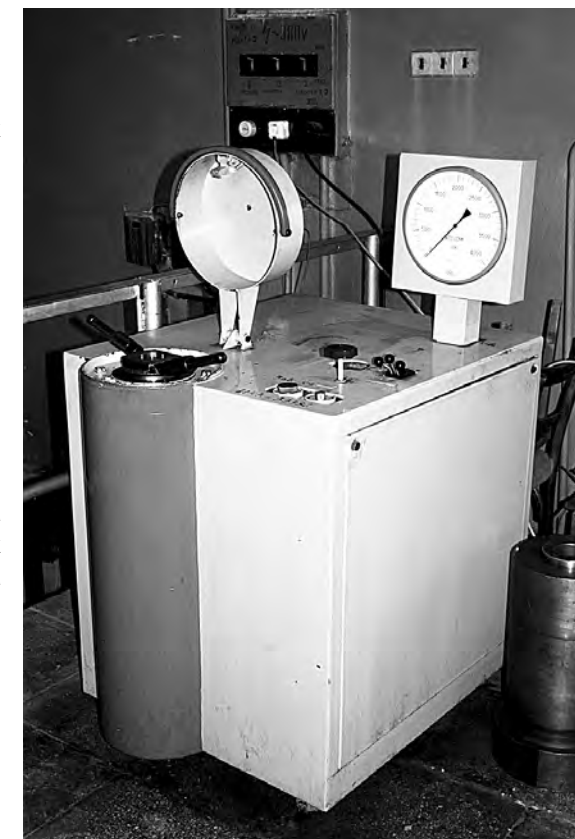
В период с 1978 по 1981 г. много усилий и времени было затрачено на монтаж этого пресса под открытым небом. Затем в основном силами сотрудников отдела высоких давлений был построен над прессом павильон, после чего начались наладочные работы. В дальнейшем прессовый зал был оснащен грузоподъемными устройствами (тельферами) для установки тяжелых устройств на стол пресса. В 1982 г. пресс был сдан в эксплуатацию.

Пресс имеет высоту трехэтажного дома, отличительной его особенностью являются большие размеры рабочего пространства: высота – 1800 мм, ширина – 1250 мм, длина – 1250 мм. Ход подвижной траверсы – 1000 мм. Пресс снабжен выдвижным столом и центральным выталкивателем. Усилие выталкивателя – 1600 кН. Большие размеры рабочего пространства пресса и значительная величина рабочего хода ползуна позволяют устанавливать на стол пресса разнообразные устройства для получения точных заготовок различных изделий.

В 1978 г. Б.И. Береснев был избран членом-корреспондентом Академии наук Украины. Он переехал в город Донецк и в Донецком физико-техническом институте Академии наук УССР возглавил отделение «Гидростатическая обработка материалов».

В 1981 г. доктор физико-математических наук, профессор Г.Г. Талуц, занимая должность заместителя директора института по научным вопросам, возглавил отдел высоких давлений. Он активно участвовал в работе по сдаче пресса в эксплуатацию и эффективно поддерживал работы по гидростатической обработке материалов.

В частности, в то время в институте активно развивался метод гидроэкструзии, который позволяет деформировать заготовки



Гидростат



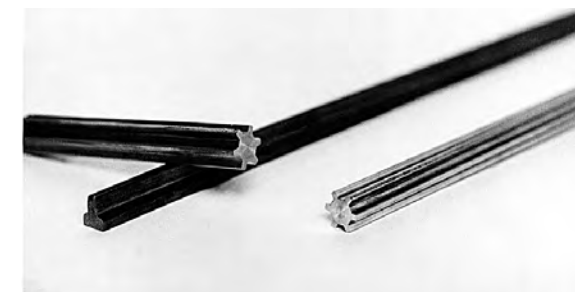
Гидравлический пресс усилием 10000 кН

жидкостью высокого давления. Благодаря наличию мощного прес-са, в ИФМ появились новые возможности по увеличению размеров деформированных изделий, повышению производительности процесса и совершенствованию методов гидроэкструзии. Метод гидроэкструзии позволяет получать из круглых стержней профильные изделия высокой точности из широкого класса металлов и сплавов при комнатной температуре.

Воздействие жидкости высокого давления на заготовку обеспечивает повышение пластичности материала и позволяет деформировать ряд хрупких металлов и сплавов. Результатом проведённых экспериментов стала разработка методик гидроэкструзии с получением различных точных профилей, имеющих диаметр описанной окружности до 40 мм и длину до 400 мм [5–7]. Разработанная технология полунепрерывной, гидромеханической экструзии точных профилей обеспечивает снижение расхода металла в 1,5–2 раза, уменьшение затрат энергии на 30 % и повышение производительности в 3–5 раз по сравнению с процессами изготовления профилей методами механообработки резанием. Результаты этих работ описаны в монографии [8].

В 80-х гг. прошлого столетия за рубежом стали активно развиваться технологии изготовления полых изделий сложной формы с использованием специальных установок. В этих установках подача сжатой жидкости в полость устройств, осуществляющих формовку заготовок, выполняется с помощью толстостенных трубчатых изделий, имеющих длинные отверстия малых диаметров. Изготовление таких отверстий методом глубокого сверления является трудоёмкой и малопродуктивной технологией. В отделе высоких давлений ИФМ была создана технология гидроэкструзии, которая позволяет изготовить изделия с отверстиями малых диаметров 0,5–3,0 мм и значительной длины 100–500 мм.

В качестве заготовки используется толстостенный образец, в котором сделано одно или несколько глухих отверстий диаметром 4–15 мм и длиной 50–150 мм. Под действием сжатой жидкости заготовка деформируется, и её наружный диаметр становится равным диаметру цилиндрического пояса матрицы, а диаметр отверстия уменьшается в зависимости от степени деформации заготовки, угла конуса матрицы и условий трения. После деформации длина изделия увеличивается в 1,5–3 раза. При формоизменении сжатая жидкость служит активным деформирующим инструментом, благодаря этому, отверстие имеет правильную геометрическую форму, а на его поверхно-



Профили, изготовленные гидроэкструзией из прутковых заготовок



Фотография образцов с длинными отверстиями малого диаметра, изготовленных гидроэкструзией на «гидравлической оправке».

сти нет складок и трещин. Этот процесс назвали «гидроэкструзией на гидравлической оправке». Применение разработанной технологии обеспечивает: 1) повышение производительности в 3–5 раз по сравнению с процессами глубокого сверления; 2) автоматический контроль качества металла изделия в процессе деформации; 3) изготовление изделий с несколькими отверстиями малых диаметров; 4) возможность конструирования и изготовления ряда деталей машин и приборов, получение которых известными методами вызывает большие трудности.

По известным причинам на рубеже веков количество сотрудников Отдела резко упало. Выполнение экспериментальных исследований по гидростатической обработке материалов и созданию новых технологий стало очень сложной задачей из-за увольнения ряда молодых сотрудников и отсутствия квалифицированных рабочих. Поэтому у администрации ИФМ возникла необходимость поиска оптимального решения для сохранения кадрового потенциала и наработанных технологий. В 1998 г. на базе отдела высоких давлений было создано две лаборатории: физики высоких давлений (во главе с к.ф.-м.н. Пилюгиным Виталием Прокофьевичем) и нелинейной механики (зав. лабораторией: д.ф.-м.н. Борисов Александр Борисович). В 2008 г. лаборатория нелинейной механики была реорганизована: теоретическая группа была выделена в отдельную лабораторию нелинейных явлений, группа д.т.н. М.В. Дегтярева перешла в лабораторию прецизионных сплавов, остальные сотрудники вместе с технологическим оборудованием и станочным парком усилили одновременно созданную лабораторию прочности (куда также вошла часть сотрудников лабораторий теории прочности и механических свойств). Возглавил лабораторию прочности д.т.н. Волков Алексей Юрьевич.

В этом момент потребовалось найти тематику, которая могла бы объединить коллектив новой лаборатории: дать новые задачи теоретикам для модельных экспериментов, предложить экспериментаторам изучить структуру и свойства материалов в новых структурных состояниях, а также загрузить технологическое оборудование. Таким новым направлением для лаборатории прочности стало исследование структуры, текстуры и механических свойств магниевых сплавов после мегапластической деформации (МПД) при комнатной температуре. Магний и его сплавы относятся к наиболее лёгким металлическим конструкционным материалам. Основными преимуществами магния являются малая плотность, превосходная удельная жёсткость, прочность, экологическая безопасность и невысокая стоимость по сравнению с большинством других материалов. Использование магниевых сплавов может способствовать облегчению транспортных средств, экономии энергии, а также созданию новых более энергоёмких источников тока – магниевых батарей.

Однако возможности потенциального применения магния на сегодняшний день сильно ограничены плохой обрабатываемостью

и ограниченной пластичностью металла при комнатной температуре. Поэтому магниевые сплавы, как правило, деформируют при подогреве до 200–250 °С. В лаборатории прочности были разработаны технологии МПД магния при комнатной температуре: методом обратного выдавливания (с использованием гидравлического пресса) и методом гидроэкструзии в саморазрушающейся оболочке (в установке М20). На эти разработки получены патенты [9, 10], результаты исследований опубликованы в отечественных и зарубежных научных журналах [11, 12].

Всё описанное выше мощное оборудование по обработке давлением находится в рабочем состоянии и позволяет решать поставленные задачи. К примеру, большое рабочее пространство гидравлического пресса позволило лаборатории внести вклад при строительстве метро в г. Екатеринбурге. При прокладке тоннеля строители метрополитена столкнулись с тем, что на перегоне от автовокзала до ботанического района резко изменился характер грунта. Вместо обычных для Урала скалистых пород, в южной части города преобладают глины с большим количеством пустот. Несущая способность такой породы минимальна, для обеспечения безопасности при перевозке людей потребовались дополнительные меры. Решение было найдено: в чугунных тубингах, из которых собирают тоннель метро, предлагалось делать отверстия и через них закачивать бетон наружу, до заполнения всех полостей в грунте. При этом оставался неясным вопрос: как изменятся прочностные свойства тубинга после заварки в нем отверстий по сравнению с исходным. Необходимые модельные эксперименты провёл на прессе ведущий технолог лаборатории А.Л. Соколов. Метростроители остались довольны: прочностные свойства тубинга после заварки отверстий не изменились.

Совсем недавно по-новому раскрылись уникальные возможности гидростатов. За рубежом было убедительно показано, что обработка пищевых продуктов в условиях всестороннего сжатия позволяет убить практически все гнилостные бактерии и грибки. Это приводит к существенному увеличению сроков хранения продуктов без использования термообработки или введения консервантов. Эксперименты, проведённые ведущим технологом лаборатории А.В. Александровым совместно с сотрудниками УрГЭУ-СИНХа, показали, что после обработки в нашем гидростате срок годности охлаждённого мяса и сосисок увеличиваются более чем в 2 раза.

В 2014 г. лаборатория прочности вошла в отдел прецизионной металлургии и технологий обработки давлением. В настоящее время в лаборатории ведутся работы по изготовлению оснастки и апробации нового метода обработки материалов, который называется «барокриодеформация». Разработанный к.ф.-м.н. П.А. Хаймовичем (Харьков) метод представляет собой квазигидроэкструзию при температуре жидкого азота. Поскольку при та-

ких низких температурах невозможно использование жидкостей, в качестве рабочего тела в методике используется металлический индий. Оснастка вместе с образцом устанавливается в ванну с жидким азотом и после необходимой для охлаждения выдержки производят деформацию. В 2017 г. сотрудник лаборатории к.ф.-м.н. Н.А. Кругликов провёл первые эксперименты по барокридеформации образцов меди и магния.

Выше были описаны различные экспериментальные методики, которые используются в лаборатории прочности для сильного деформационного воздействия на образцы из различных материалов с целью создания в них новых структурных состояний. В то же время в лаборатории прочности активно работает группа теоретиков, которая решает актуальные задачи физики прочности для широкого круга пространственно-временных уровней исследуемых объектов. Сотрудники лаборатории д.ф.-м.н. Людмила Ивановна Яковенкова и д.ф.-м.н. Лидия Евгеньевна Карькина были одними из первых не только в ИФМ УрО РАН, но и в нашей стране, кто стал использовать компьютерное моделирование структуры дефектов при исследовании материалов. В 80-е годы это называлось машинным моделированием или ЭВМ-экспериментом, а расчёты проводили (например, на машинах БЭСМ-6 или ЕС-1045 др.) в ИММ УрО РАН, загружая в ЭВМ толстенные колоды перфокарт и получая рулоны распечаток.

Л.И.Яковенкова и Л.Е.Карькина провели комплексное (экспериментальное и теоретическое) исследование алюминидов титана, обладающих целым рядом уникальных свойств. Эти сплавы имеют низкую плотность, высокую температуру плавления, стабильные модули упругости и повышенные прочностные характеристики. Многие упорядоченные сплавы, благодаря эффекту термического упрочнения, имеют важное прикладное значение, тем более что аномальное повышение предела текучести во многих случаях сохраняется и в композитах, где упорядоченная фаза присутствует в виде выделений.

Теоретики лаборатории получили важные приоритетные результаты, позволившие объяснить наблюдение аномальной зависимости предела текучести в Ti_3Al , для пирамидального скольжения $2c+a$ сверхдислокаций и существенное различие деформации до разрушения при скольжении a -сверхдислокаций в плоскостях базиса и призмы. Они занимались решением другой не менее интересной проблемы, связанной деформационным поведением Ti_3Al , – низким значением (по сравнению с пирамидальным скольжением) предела текучести при базисном скольжении при одновременно низком значении деформации до разрушения. Это привело к пониманию причин низкой пластичности Ti_3Al при комнатной температуре, затрудняющей обрабатываемость этих материалов и препятствующей их широкому практическому использованию.

Компьютерное моделирование дефектов методом молекулярной динамики проводилось с использованием оригинальных

модельных N -частичных потенциалов межатомного взаимодействия для Ti_3Al со сверхструктурой D019. Потенциалы были рассчитаны методом «погружённого атома» специально для этих исследований. В 2008 г. была выпущена монография [13], в которую вошли приоритетные результаты компьютерного моделирования структуры ядра скользящих и заблокированных конфигураций a - и $2c+a$ -сверхдислокаций, результаты расчётов γ -поверхностей и энергии обобщённых дефектов упаковки в плоскостях базиса, призмы и пирамиды I и II типа в Ti_3Al . Эта монография, является, по-видимому, единственной, которая посвящена детальному экспериментальному и теоретическому изучению монокристаллического Ti_3Al .

В монографии систематизированы литературные данные и результаты исследований авторов по комплексному (экспериментальному и теоретическому) изучению дислокационной структуры, особенностей деформации и разрушения монокристаллического Ti_3Al в широком интервале температур. Авторами предложен общий подход к объяснению закономерностей деформационного поведения исследуемого интерметаллида на основе анализа структуры ядра сверхдислокаций. Особое внимание уделено взаимосвязи между наблюдаемыми температурными аномалиями механических свойств и дислокационными превращениями. Также была рассмотрена модель термического упрочнения, которая базируется на особенностях структуры ядра $2c+a$ -сверхдислокаций в плоскостях пирамиды I и II типа. Метод молекулярной динамики использован авторами также для оценки критерия хрупкого разрушения Ti_3Al из анализа соотношения между конкурирующими процессами: склонностью материала к сколу и пластической релаксацией напряжений вблизи вершины трещины. В модели Райса-Томпсона проведён анализ ориентационной зависимости параметра хрупкого разрушения. Предложена модель образования микротрещин сдвигового типа, основанная на непланарном характере структуры ядра a -сверхдислокаций винтовой ориентации в плоскости базиса.

В 2011 г. теоретики лаборатории опубликовали книгу в научно-образовательной серии «Физика конденсированных сред», которая была основана ИФМ [14]. Книга посвящена одному из современных методов исследований в материаловедении – моделированию атомной структуры дефектов. Она включает в себя методически последовательное изложение взаимосвязанных разделов в физике реальных кристаллов, таких как структура и энергия точечных и планарных дефектов; структура ядра дислокаций; компьютерное моделирование взаимодействия между дефектами; динамические процессы радиационных повреждений в металлах и сплавах; атомистические расчёты структуры основного состояния микрокластеров и кинетики их превращений и др. Перечисленные разделы являются уже достаточно устоявшимися направ-

лениями в физике реальных кристаллов и введены в курсы лекций для студентов физико-технического и металлургического факультетов УГТУ-УПИ. Большое внимание в книге уделяется взаимосвязи между результатами атомистических расчётов и особенностями поведения реальных металлов и сплавов при деформации, разрушении, радиационном повреждении, фазово-структурных превращениях.

Группа теоретиков лаборатории прочности – д.ф.-м.н. Л.Е. Карькина, к.ф.-м.н. И.Л. Ломаев и к.ф.-м.н. М.В. Петрик – принимала активное участие в выполнении работ по проекту РНФ «Термодинамика и кинетика ранних стадий распада в поликристаллических сплавах. Первопринципное и атомистическое моделирование сплавов на основе ОЦК Fe и ГЦК Al» (руководитель: д.ф.-м.н. П.А. Коржавый). С использованием методов теории функционала электронной плотности впервые были проведены расчёты энергий парных и многочастичных (тройных и четверных) эффективных взаимодействий между легирующими элементами в двойных и тройных системах ГЦК Al–X, Al–X–Y, (X, Y = Mg, Cu, Si, Zn, Mn). С использованием полученных результатов построена кинетическая теория распада сплавов ГЦК Al–X, методами Монте-Карло (МК) проведено атомистическое моделирование образования предвыделений (зон Гинье-Престона) в сплавах на основе Al. Выполнено модельное исследование кинетики распада и образования выделений в многокомпонентных сплавах для системы Fe–Cu–(Ni, Mn)–(Al, Si). Показано, что добавки Al и Ni ускоряют образование выделений, в то время как Si и Mn не оказывают заметного влияния на этот процесс. В поликристаллическом сплаве Fe–Cu исследована кинетика распада с использованием комбинированного подхода, сочетающего молекулярную динамику и Монте Карло моделирование. Показано, что в нанозёрненных материалах с низкой растворимостью компонентов, образование сегрегаций на границе зерна подавляет распад в его объёме, но реализуется в приграничной области.

В 2010 г. «Международная издательская компания «Наука/INTERPERIODICA» присудила Премию за лучшую публикацию в журналах РАН сотрудникам лаборатории д.ф.-м.н. Кондратьеву Владимиру Васильевичу и к.ф.-м.н. Кесареву Александру Геннадьевичу за цикл работ «Теория атомной диффузии в неоднородных средах и её приложение к наноструктурным материалам: описание зернограничной диффузии», опубликованных в журнале «Физика металлов и металловедение» в 2008–2010 гг.

За последнее время в лаборатории прочности защищена 1 докторская диссертация (Казанцева Н.В.) [15] и две кандидатские диссертации (О.С. Новикова и М.В. Петрик) [16, 17]. Происходит набор новых кадров: аспирантка Д.А. Комкова под руководством к.ф.-м.н. О.В. Антоновой изучает структуру и свойства магниевых сплавов после МПД, инженер-исследователь А.Е. Костина под ру-



Сотрудники лаборатории прочности (слева направо).
Нижний ряд: к.ф.-м.н. Кесарев А.Г., д.ф.-м.н. Карькина Л.Е., лаборант Соломеина Н.А., д.ф.-м.н. Яковенкова Л.И., к.ф.-м.н. Новикова О.С., документовед Солдатова В.И.
Верхний ряд: технолог Соколов А.Л., к.ф.-м.н. Кругликов Н.А., к.т.н. Новожинов В.И., д.ф.-м.н. Кондратьев В.В., технолог Козлов В.Г., технолог Александров А.В., д.т.н. Волков А.Ю., инженер Клюкин И.В., к.т.н. Каменецкий Б.И., термист Орлов С.Ю., к.ф.-м.н. Антонова О.В.

ководством к.ф.-м.н. О.С. Новиковой использует криодеформацию для повышения функциональных свойств сплавов на основе системы медь-палладий. Каждый год в лаборатории прочности проходят научную практику студенты УрФУ. Кроме того, сотрудники лаборатории (Л.И. Яковенкова, Л.Е. Карькина и Н.А. Кругликов) активно занимаются преподавательской деятельностью, читая курсы лекций в УрФУ.

Б.И. Каменецкий, Л.И. Яковенкова, А.Ю. Волков

Список литературы

1. П. Бриджмен, *Исследования больших пластических деформаций и разрыва*, Изд-во иностр. лит., Москва (1955), 444 с.
2. Б.И. Береснев, Л.Ф. Верещагин, Ю.Н. Рябинин, Л.Д. Лифшиц, *Некоторые вопросы больших пластических деформаций металлов при высоких давлениях*, Изд-во АН СССР, Москва (1960), 58 с.
3. Б.И. Береснев, Е.Д. Мартынов, К.П. Родионов, Д.К. Булычев, Ю.Н. Рябинин, *Пластичность и прочность твердых тел при высоких давлениях*, Наука, Москва (1970), 160 с.

4. Ю.Н. Логинов, Б.И. Каменецкий, Д.К. Булычев, А. с. № 959921 (1982).
5. Б.И. Каменецкий, Б.И. Береснев, В.А. Обухов, А.В. Александров, Е.В. Трушин, В.П. Дементьев, А. с. № 770635 (1980).
6. Б.И. Каменецкий, Ю.Ф. Бабин, В.А. Обухов, Г.Г. Талуц, А.Д. Пельц, А.М. Хохлов, А. с. № 1406892 (1986).
7. Б.И. Каменецкий, Ю.Ф. Бабин, М.В. Колмогоров, А. с. № 1532172 (1989).
8. Б.И. Береснев, К.И. Езерский, Е.В. Трушин, Б.И. Каменецкий, *Высокие давления в современных технологиях обработки материалов*, Наука, Москва (1988). 245 с.
9. Б.И. Каменецкий, А.Л. Соколов, А.Ю. Волков, Н.А. Кругликов, Пат. РФ № 2501624, (2012).
10. Б.И. Каменецкий, А.Ю. Волков, А.Л. Соколов, О.В. Антонова, И.В. Ключин, Пат. РФ № 25630077 (2014).
11. А.Ю. Volkov, I.V. Kliukin, Mater. Sci. Eng. A, **627**, 56 (2015).
12. O.V. Antonova, A.Yu. Volkov, B.I. Kamenetskii, D.A. Komkova, Mater. Sci. Eng. A **651**, 8 (2016).
13. Л.И. Яковенкова, Л.Е. Карькина, *Структура ядра дислокаций и деформационное поведение монокристаллического Ti_3Al* , Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2008), 196 с.
14. Л.Е. Карькина, Л.И. Яковенкова, *Моделирование атомной структуры дефектов в кристаллах*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2011), 462 с.
15. Н.В. Казанцева, Дисс. ... докт. физ.-мат. наук, УрО РАН, Екатеринбург (2011).
16. О.С. Новикова, Дисс. ...канд. физ.-мат. наук, УрО РАН, Екатеринбург (2015).
17. М.В. Петрик, Дисс. ...канд. физ.-мат. наук, УрО РАН, Екатеринбург (2015).

ЛАБОРАТОРИЯ

физики

высоких давлений

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Пилюгин Виталий Прокофьевич, заведующий лабораторией, к.ф.-м.н.
- Бахтеева Юлия Анатольевна, научный сотрудник, к.х.н.
- Власова Алиса Михайловна, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Гапонцева Татьяна Михайловна, младший научный сотрудник
- Гринберг Бэлла Александровна, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор
- Гундырев Вячеслав Михайлович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Добромыслов Аркадий Васильевич, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор
- Иноземцев Алексей Владимирович, старший научный сотрудник, к.т.н.
- Медведева Ирина Владимировна, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Пацелов Александр Михайлович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Пацелова Валентина Константиновна, старший лаборант
- Пашеев Анатолий Васильевич, главный специалист
- Плотников Алексей Викторович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Попова Ольга Владимировна, ведущий документовед
- Пушкин Марк Сергеевич, младший научный сотрудник
- Талуц Нина Иосифовна, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Толмачев Тимофей Павлович, младший научный сотрудник
- Чернышев Евгений Геннадьевич, старший инженер
- Чурбаев Равиль Валинурович, научный сотрудник, к.ф.-м.н.

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

Лаборатория физики высоких давлений исторически основана в конце 1949 г., её заведующим назначен Николай Андреевич Смирнов, а с 1955 г. – Кузьма Петрович Родионов. В различные периоды работы и развития института Лаборатория являлась как самостоятельной структурной единицей, так и частью Отдела гидроэксструзии, затем, с 1981 г., отдела высоких давлений, в который входили лаборатории так или иначе связанные с исследованием твёрдого тела и конденсированного состояния под давлением со спецификой измерений физических величин различной природы, диапазона давлений или развития технологических процессов под давлением. Работы и этапы развития лаборатории удобнее освещать по периодам, когда лабораторией заведовали разные руководители.

В период с 1974 по 1981 гг. Отделом руководил д.т.н. Б.И. Береснев, в этот период наибольшее внимание уделялось развитию метода гидроэксструзии и особенностям структурных и фазовых превращений d-переходных металлов и сталей в условиях пластической деформации под гидростатическим давлением до 1,5 ГПа. Кроме того, уделялось внимание развитию технологических аспектов гидроэксструзии с целью производства изделий определённого профиля. Значительный вклад в развитие методов гидроэксструзии и исследования структурных изменений преимущественно сталей внесли учёные-исследователи: к.т.н. Б.И. Каменецкий, к.т.н. В.Ф. Шишминцев, д.т.н. проф. В.Л. Колмогоров, структурщики к.т.н. Л.С. Давыдова, к.т.н. Р.Н. Ещенко, к.т.н. Г.К. Пегушина, а также к.ф.-м.н. Гундырев В.М., развивший метод рентгеновской топографии для оценки результатов воздействия высокого давления на исследуемые материалы. Этот период в истории лаборатории был наиболее плодотворным по развитию метода



К.П. Родионов

гидроэкструзии, кадрового роста, контактов с другими подразделениями института и сотрудничества с заказчиками. Численность отдела выросла до 75–80 постоянно работающих сотрудников. В отдел давались новые ставки учёных и инженеров. Многие сотрудники с учёными степенями, особенно из лабораторий физического металловедения, механических свойств, фазовых превращений и цветных сплавов, а также из вузовской науки пришли в отдел и лабораторию. Это укрепляло связи лаборатории с другими подразделениями, открывались новые направления, что способствовало повышению уровня исследований и разнообразию в плане исследуемых материалов и появлению новых методик. Фактически отдел и лаборатория в миниатюре отражали все направления исследований, проводимых в институте, но через свою «специфическую призму» сильного сжатия – высоких давлений в различных диапазонах, от гидростатического, порядка 1 гигапаскаля, до квазигидростатического, на порядок более высокого и приближающегося к динамическому диапазону мегабарных величин.

Период бурного развития и становления лаборатории приходится на 70-е и 80-е годы прошлого века, когда в институте был реализован и внедрён в применение предложенный ещё П.В. Бриджменом метод гидроэкструзии. Тот период и последующие 25–30 лет, несомненно, были «золотым веком» лаборатории и отдела высоких давлений.

С 1982 года отдел возглавил профессор Г.Г. Талуц. В это время, в отделе высоких давлений получили развитие и теоретические исследования в области прочности, пластичности и барических фазовых переходов в твёрдом теле. В частности был выполнен цикл работ по влиянию давления на характер взаимодействия трещины с точечными и линейными дефектами в различных материалах. Большой вклад в данное направление внесли теоретики К.П. Родионов, А.Б. Борисов, В.Т. Шматов, В.В. Киселев, В.А. Фейгин. Также развивались теоретические исследования по уравнениям состояния вещества, теории сверхпроводимости, влиянию давления и схем напряжённого состояния на ресурс пластичности различных металлов и сплавов, в том числе тугоплавких металлов, сверхпроводящих керамик, и щелочно-галлоидных соединений, сталей и сверхтвёрдых материалов. За успешное выполнение правительственного задания в области разработки новых материалов с особыми свойствами ряд сотрудников Института, и в том числе



Б.И. Береснев



Г.Г. Талуц

заведующий отделом высоких давлений, д.ф.-м.н. профессор Талуц Г.Г. в 1989 г. удостоен звания лауреата Премии Совета Министров СССР.

Следует отметить целое направление по развитию технологий изготовления изделий в области инфракрасной оптики, которое развивалось в лаборатории в 80–90-е гг. В рамках данного направления выполнялись исследования по взаимосвязи оптических свойств щелочно-галлоидных и ионных соединений на основе хлоридов и бромидов серебра, хлоридов натрия и калия, с их микроструктурой. Микроструктура формировалась при различных режимах термобарического и деформационного воздействия из исходных оптических монокристаллов солей.

Работы изначально выполнялись в группе В.Г. Козлова, затем в группе, руководимой с.н.с. к.ф.-м.н. Р.И. Кузнецовым. Для формирования изделий было создано оригинальное оборудование по гидропрессованию и разработаны технологии, позволяющие формировать одноядерные и двуядерные инфракрасные световоды многометровой протяжённости. Полученные световоды обладали высоким внутренним отражением инфракрасного лазерного излучения, что позволило минимизировать потери излучения и передавать инфракрасное излучение от лазера к объекту. Изделия нашли применение в медицине для выполнения лапароскопических внутриполостных операций.

Значительный вклад в выполнение данных разработок внесли сотрудники лаборатории: Р.И. Кузнецов, А.В. Пашеев, В.И. Быков, В.П. Чернышёв, а также Н.А. Ефремов, Т.Д. Булычева, Н.Б. Ивченко. По результатам исследований Н.Б. Ивченко защитила кандидатскую диссертацию. Работы выполнялись в содружестве с УПИ (Екатеринбург), Государственным оптическим институтом (Санкт-Петербург), Институтом общей физики РАН (Москва), ОАО Уралпредметом (г. Верхняя Пышма, Свердловская область), ОАО «Кристалл» (г. Усолье Сибирское, Иркутская область).

В разработку, совершенствование и создание камер гидростатического диапазона существенный вклад внесли учёные и инженеры лаборатории, инженер-конструктор М.А. Олейник, научные сотрудники Ю.С. Берсенёв, А.Н. Мартемьянов, к.ф.-м.н. К.М. Демчук, д.ф.-м.н. И.В. Медведева, д.ф.-м.н. профессор Н.П. Гражданкина и другие. Созданы и применяются одно- и двухкорпусные камеры гидростатического диапазона максимального давления до 3,0 ГПа с коническими электропроводами через обтюраторы оригинального уплотнения из полимерных материалов. В создание и эксплуатацию камер термосинтеза квазигидростатического диапазона давления до 8–10 ГПа по типу тороидальной камеры Верещагина-Хвостанцева основной вклад внесли сотрудники К.М. Демчук, А.В. Пашеев, А.Н. Мартемьянов. Камеры мегабарного диапазона на синтетических и природных алмазах и сапфирах создавали к.ф.-м.н. К.М. Демчук и А.М. Пацелов. Следует также отметить

создание ими в 80-е годы оригинальных камер для нейтронографических исследований под давлением до 2,0 ГПа. В этот же период к.ф.-м.н. Р.В. Чурбаевым были созданы методики испытания материалов с записью диаграмм состояния под гидростатическим давлением, что позволяет проводить исследования влияния давления на пластичность и характер разрушения материалов в схеме растяжения, скручивания и их комбинации.

Для проведения исследований по влиянию пластических деформаций от малых степеней до мегапластических величин под высоким давлением В.П. Пилюгиным и Р.И. Кузнецовым создана методика сдвига под высоким давлением на наковальнях Бриджмена в диапазоне температур 78–800 К. Последние годы в усовершенствование данной методики по измерению величины напряжения сдвига от давления и степени деформации внёс научный сотрудник Т.П. Толмачёв. Повествование о методических возможностях лаборатории нельзя считать полным, если не отметить создание портативных камер сжатия и сжатия в сочетании со сдвиговой деформацией, позволяющих выполнять рентгеноструктурные исследования материалов *in situ* непосредственно под давлением. Данные камеры выполнены к.ф.-м.н. Д.И. Тупицей и научным сотрудником Е.Г. Чернышёвым, применяются для исследований в пучках жёсткого рентгена синхротронного излучения в СЦСТИ СО РАН в Новосибирске, в содружестве с к.х.н. А.И. Анчаровым и д.х.н. Б.П. Толочко.

Самый высокий диапазон давлений достигается динамическим воздействием, особенно в схеме сферически сходящихся ударных волн. Здесь в лаборатории выполнены и продолжают выполняться исследования по структурным и фазовым превращениям *d*-переходных металлов и сталей. Проведены исследования по барическим фазовым превращениям в титане, цирконии и сплавах на их основе. Установлены особенности структурного состояния металлов в зависимости от интенсивности экстремальных баротермических воздействий в диапазоне до 3000 ГПа, что многократно превышает условия сжатия в центре нашей планеты и составляет четвертую часть от давления в центре планеты-гиганта Юпитера. Выполненные в этом направлении работы д.ф.-м.н., профессором Добромисловым А.В., д.ф.-м.н. Н.И. Талуц и д.ф.-м.н. В.А. Тепловым легли в основу понимания поведения вещества при экстремальных взрывных нагрузениях.

В период 90-х и начало 2000-х гг. под руководством д.ф.-м.н. И.В. Медведевой при участии Ю.С. Берсенёва, активно проводились исследования по влиянию давления на электрические и магнитные свойства оксидных соединений редкоземельных металлов и их интерметаллидов.

С приходом в лабораторию профессора, д.ф.-м.н. Б.А. Гринберг, тематика работ расширилась до исследований структурных состояний поверхностей раздела соединений, получаемых свар-

кой взрывом, а также эволюций дислокационных структур в интерметаллидах и металлах при сдвиге под давлением в наковальнях Бриджмена. Для выполнения работ по этой новой тематике привлекаются молодые кандидаты наук и аспиранты А.В. Иноземцев, А.М. Власова, А.В. Плотников, М.С. Пушкин и др. В 2010 г. к.ф.-м.н. А.М. Пацеловым и ведущим технологом А.В. Пашеевым была реализована новая методика производства композиционных материалов, и начинает развиваться ещё одно новое направление работ, связанных с реакционным спеканием под давлением слоистых композитов типа «металл - интерметаллид».

Ныне лаборатория физики высоких давлений является структурной частью отдела прецизионной металлургии и технологий обработки давлением, и сотрудники лаборатории продолжают свои исследования в рамках научных тематик отдела, тесно сотрудничая с другими подразделениями Института физики металлов, академическими и учебными институтами других регионов. Как и прежде, развиваются традиционные для лаборатории направления исследований, такие как структурные и фазовые превращения металлов и сталей, вызываемые различными физическими параметрами и видами воздействий – давлением, температурой, деформацией, облучением и их различными взаимными сочетаниями. Последние годы активно исследуются структурные



Коллектив лаборатории физики высоких давлений в 2012 году

превращения тугоплавких металлов при деформации под высоким давлением. Получены результаты деформационного формирования нанокристаллических структур в тугоплавких металлах, в частности, в молибдене, иридии, ниобии, рении и вольфраме.

В рамках сотрудничества продолжаются совместные исследования учёными различных регионов России и других стран, в их числе, Санкт-Петербургский физико-технический имени Иоффе, Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН, Института химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Института проблем прочности и материаловедения СО РАН, Института электрофизики УрО РАН, Уральский федеральный университет, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербургский университет, Институт металлофизики НАНУ, Донецкий физико-технический институт, Гёттингенский университет, Институт Хана Мейтнера (Берлин) и др.

В.П. Пилюгин

ОТДЕЛ

радиационной физики и нейтронной спектроскопии

ЛАБОРАТОРИЯ

нейтронных
исследований
вещества

Состав лаборатории

(по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Бобровский Владимир Иванович, заведующий лабораторией, к.ф.-м.н.
- Воронин Владимир Иванович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Вохмянин Александр Павлович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Гощицкий Борис Николаевич, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, профессор
- Губкин Андрей Федорович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Казанцев Вадим Аркадьевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Проскурнина Наталья Владимировна, старший научный сотрудник, к.х.н.
- Скрябин Юрий Николаевич, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор
- Соломина Галина Михайловна, ведущий документовед
- Шерстобитова Елена Александровна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

ОТДЕЛ
работ на атомном
реакторе
(обособленное
подразделение)

Состав отдела (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Пархоменко Виталий Данилович, заведующий отделом, к.ф.-м.н.
- Богданов Савва Григорьевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Боярский Юрий Петрович, ведущий инженер
- Валиев Эдуард Зуфарович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Гобова Лидия Викторовна, ведущий документовед
- Денисенко Николай Федорович, инженер
- Ермакова Светлана Валерьевна, старший лаборант
- Карепина Светлана Викторовна, старший лаборант
- Ковальская Ирина Викторовна, технолог
- Козлов Александр Иванович, главный специалист
- Комелин Андрей Николаевич, ведущий инженер
- Корнев Алексей Вячеславович, инженер-энергетик
- Максимов Вениамин Игоревич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Максимова Елена Николаевна, младший научный сотрудник
- Митусов Александр Валентинович, технолог
- Панюшин Виктор Павлович, оператор установок 6 разряд
- Петрова Галина Михайловна, старший лаборант
- Петрова Любовь Филипповна, ведущий технолог
- Пирогов Александр Николаевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Пирогов Денис Александрович, старший лаборант
- Сидорова Влада Витальевна, ведущий технолог
- Теплых Александр Еренеевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Тигин Евгений Викторович, водитель 5 разряд
- Федотов Алексей Владимирович, инженер
- Федотов Владимир Александрович, оператор установок 6 разряд
- Хейнштейн Яков Шмуилович, главный специалист

ИСТОРИЯ ОТДЕЛА радиационной физики и нейтронной спектроскопии

В 50-х годах XX века стало ясно, что методы, основанные на использовании пучков медленных нейтронов, предоставляют уникальные возможности для исследований в области физики конденсированного состояния. Так совпало, что на завершающей стадии Атомного Проекта по инициативе И.В. Курчатова и А.П. Александрова в 1959 г. руководящими органами СССР было принято решение о создании региональных ядерных научно-исследовательских центров, призванных содействовать дальнейшему развитию атомной науки страны. В результате, в СССР начинается масштабное сооружение исследовательских реакторов, оснащение их нейтронными дифрактометрами и развитие науки нейтронографии.

Необходимость располагать такими методиками на Урале, одном из важнейших промышленных регионов страны, была немедленно осознана учёными Института физики металлов АН СССР, многие из которых ранее были активными участниками советского Атомного проекта. В продвижении этой идеи были задействованы академики С.В. Вонсовский, А.П. Александров, М.Д. Миллионщиков, М.В. Келдыш, Н.А. Доллежал. В самом Институте физики металлов основными «толкачами» затеи выступили Лауреат Ленинской премии профессор С.К. Сидоров и заведующий Лабораторией излучений А.К. Кикоин.

На начальном этапе реализации этой идеи рассматривали различные варианты ведомственной принадлежности и размещения будущего центра. В частности, предлагали включить его в состав физико-технического факультета Уральского политехнического института. Рассматривались и другие варианты, сопровождавшиеся затяжной межведомственной перепиской. Однако в конечном итоге Правительством СССР и ЦК КПСС было принято решение, что бу-

дущий научно-исследовательский центр будет создан под крылом всеильного Министерства среднего машиностроения, а АН СССР на договорных началах будут предоставляться нейтронные пучки и помещения для проведения экспериментальных работ. Проектирование исследовательского атомного реактора для центра велось в Научно-исследовательском и конструкторском институте энерготехники (НИКИЭТ), откуда в значительной степени были взяты и кадры нового института, предназначенного теперь стать экспериментальной базой НИКИЭТа.

Следует отметить удачный выбор площадки для строительства объекта – бок о бок с сооружавшейся тогда же Белоярской атомной электростанцией. Впоследствии это помогло решить массу проблем с проведением совместных исследований. Строили быстро. В 1961 г. заложили первый кирпич, а уже в 1966 г. был произведён пуск реактора ИВВ-2, и началась исследовательская работа. При старте новорожденный центр получил имя Свердловский физико-технический институт. Но спустя всего несколько лет сменил название на более соответствующее фактической стороне дела – Свердловский филиал НИКИЭТ (СФ НИКИЭТ). Ныне, пережив года расцвета, застоя и перестройки, сопровождавшиеся перетрясками и переименованиями, он живёт под именем АО «Институт реакторных материалов» Госкорпорации Росатом.

С самого начала, ещё на стадии проектирования, в нём было предусмотрено создание экспериментальных возможностей и площадей для Академии наук, участвовавшей в строительстве центра в качестве дольщика. В конструкцию атомного реактора были заложены горизонтальные экспериментальные каналы для вывода пучков медленных нейтронов для нейтронных дифрактометров и спектрометров Института физики металлов, которые ещё предстояло разработать и создать.

В 1963 г. практически одновременно с началом сооружения реактора в Институте физики металлов было сформировано подразделение для будущих нейтронографических исследований во главе с Сергеем Константиновичем Сидоровым. Самыми первыми сотрудниками новой Лаборатории нейтронографии стали: Ю.А. Изюмов, В.В. Ключин, А.В. Дорошенко, В.В. Келарев. Было очевидно, что предстоит огромная работа в совершенно новой области, начинавшаяся здесь с нуля. Поэтому ставка была сделана на молодость и энтузиазм. В штат лаборатории набирали выпускников местного физтеха и университета. Несколько ребят приехали из томского Политеха. Было принято стратегически верное решение послать молодых сотрудников на продолжительную стажировку на уже функционирующие в стране исследовательские реакторы. В Курчатовский институт поехали В.Е. Архипов, Ю.Г. Чукалкин, Ю.Н. Михайлов. На реактор в Саласпилсе отправились В.Д. Пархоменко и А.И. Козлов. Это позволило не только достичь резкого повышения квалификации персонала, но и уста-

новить научные и человеческие связи с коллегами, которые поддерживаются уже десятилетия.

Большой удачей стало формирование в рамках лаборатории теоретической группы во главе с Ю.А. Изюмовым. Занимались они в основном проблемами квантовой теории магнетизма, но, в соответствии с территорией обитания, уделяли много внимания и описанию магнитного рассеяния нейтронов в исследовавшихся ими системах. Свидетельством выхода группы на мировой уровень стало издание в 1966 г. монографии Ю.А. Изюмова, Р.П. Озерова «Магнитная нейтронография», ныне признанной во всём мире классической. Следует отметить, что хотя в 1974 г. группа Ю.А. Изюмова выделилась в независимую Лабораторию теории твёрдого тела, плодотворные связи её с нейтронографистами полностью сохранились, что весьма способствовало поднятию уровня работ по этой тематике в институте, да и в стране в целом.

По мере развития и оснащения экспериментальной базы на реакторе ИВВ-2 и планируемого расширения тематики работ за пределы проблем магнетизма, стало ясно, что усложнившийся круг научных, технических и организационных проблем требует реорганизации структуры лаборатории и её руководства. Для решения их в 1969 г. был создан научно-технический Отдел



«Толкучка» у реактора. 70-е годы

работ на атомном реакторе, который наряду с Лабораторией магнитной нейтронографии и Лабораторией диффузии (так стала называться Лаборатория излучений) входил теперь в большой Отдел радиационной физики твёрдого тела под руководством С.К. Сидорова. Руководить же самим ОРАРом по рекомендации С.В. Вонсовского и С.К. Сидорова пригласили хорошо известного им молодого и энергичного сотрудника Новоуральского электрохимического комбината (тогда он назывался п/я 318 или Свердловск-44) Б.Н. Гощицкого. С его приходом начинается период бурного роста зареченского подразделения Института. Создаются службы механиков, криогенщиков и электронщиков. Какое-то оборудование разрабатывается самостоятельно с помощью КБ ИФМ, что-то заказывается на машиностроительных заводах Свердловска (Химмаше, Турбомоторном), что-то достаётся всеми правдами и неправдами. В результате достаточно быстро, к концу 70-х гг., в Заречном работает уже целый комплекс научных установок, где помимо нейтронных дифрактометров есть и такие уникалы мирового масштаба, как криогенный канал для облучения образцов материалов в активной зоне ядерного реактора при азотных температурах.

В 70-е годы «отстоялись» и научная тематика, и научный коллектив подразделения, произошло его разделение «по интересам». В 1974 г. Отдел работ на атомном реакторе обрёл статус полноценной лаборатории, ориентированной на радиационную физику и исследования кристаллической структуры материалов



Б.Н.Гощицкий и В.И. Бобровский «веляют» статью. 1973 г., Word ещё не изобрели

и существующей параллельно лаборатории магнитной нейтронографии, сосредоточившейся на изучении магнитных структур под руководством С.К. Сидорова и А.З. Меньшикова. Мощный импульс этой деятельности придала построенная в 1964 году С.К. Сидоровым и А.В. Дорошенко феноменологическая теория намагнитченности неупорядоченных твёрдых растворов со смешанным ферро- и антиферромагнитным обменным взаимодействием. Ушла в независимое плавание изюмовская Лаборатория теории твёрдого тела, оставаясь, впрочем, как и Лаборатория диффузии, составной частью ОРФТТ. В 1974 г. средний возраст научных сотрудников ОРАР (не считая руководства) не превышал 30 лет! Заведующий отделом, Б.Н. Гощицкий, которому исполнилось аж 43 года, казался своей команде весьма почтенным пожилым человеком. Пошли годы нормальной научной работы. Получались результаты, росли люди, защищались диссертации. Всего до настоящего времени из сотрудников ОРАР и ЛМН выросло 22 кандидата и 9 докторов физико-математических наук.

В 70-х годах XX века в СССР сложилось тесно спаянное «нейтронное сообщество», объединившее учёных полутора десятков нейтронографических центров страны. Мы постоянно ездили друг к другу и на эксперименты, и на семинары, а также встречались на регулярных Всесоюзных Совещаниях по использованию рассеяния нейтронов в физике твёрдого тела, большая часть которых проводилась именно в Заречном, поскольку там был обеспечен радушный приём не только со стороны организаторов конференции, т.е. ИФМ, но и городской администрации, а также администрации ДК «Ровесник», где и проходили заседания. Эта благосклонность объяснялась просто: полным «хозяином» в Заречном была Белоярская атомная электростанция, а её руководство хорошо относилось к науке вообще, а уж к нейтронной – тем более. Быстро развивавшаяся отрасль науки пользовалась вниманием и высшего руководства Академии. У нас в гостях побывали президенты АН СССР М.В. Келдыш и А.П. Александров, глава Министерства РФ по атомной энергии и наш коллега А.Ю. Румянцев (неоднократно), многие ведущие учёные АН СССР, а также руководители Свердловской области.

Что изучали. Лаборатория магнитной нейтронографии сосредоточилась на исследовании магнитных структур различных материалов. Впервые в руках экспериментаторов оказался инструмент, позволяющий напрямую определять магнитные моменты, локализованные в узлах кристаллических решёток, а оснащение дифрактометров криостатами и печками дало возможность изучать и магнитные фазовые переходы. Объектов было много. Разнообразные сплавы и соединения переходных металлов, редкоземельных элементов и различные их комбинации. В этих направлениях систематически работали А.З. Меньшиков, В.В. Келарев, А.П. Вохмянин, Э.З. Валиев, В.А. Казанцев, Ю.А. До-



Профессор С.К. Сидоров даёт пояснения Президенту АН СССР М.В. Келдышу.
(Крайний слева – А.З. Меньшиков)

рофеев, С.Г. Богданов, С.Ф. Дубинин, С.Г. Теплоухов, Г.П. Гасникова, А.Н. Пирогов, В.В. Чуев, А.Е. Теплых.

В ОРАР магнитная тематика имела несколько другую направленность. Она была акцентирована на исследование радиационных эффектов в окисных магнетиках, которые возникали при облучении их быстрыми нейтронами. Это были разнообразные ферриты, антиферромагнетики и т.п. Эта деятельность имела и очевидное прикладное значение, поскольку речь шла о материалах для электроники, работающей в условиях радиационных полей. Над всем этим усердно трудились Ю.Г. Чукалкин, В.Д. Пархоменко, В.Г. Вологин, В.В. Петров, В.Р. Штирц. Вообще надо отметить, что в смысле лабораторной принадлежности многие исследования в ЛМН и ОРАР были перепутаны. Что-то исследовали вместе, что-то порознь. Особого внимания на это просто не обращали. Круг объектов, исследуемых в ОРАР, магнитными материалами отнюдь не ограничивался. Организационно это привело к переименованию в 1977 г. Отдела работ на атомном реакторе в Лабораторию радиационной физики и нейтронной спектроскопии (ЛРФНС, зав. Б.Н. Гощицкий).

Самое активное и прямое участие в наших исследованиях, развитии наших методик и приборной базы принимала также группа коллег из Института химии твёрдого тела УрО РАН под руководством В.Г. Зубкова (ныне профессора и доктора физ.-мат. наук).

В 70-х годах в ИФМ начались интенсивные исследования в области сверхпроводимости, захватившие как теоретиков, так и экспериментаторов. Не остались в стороне и нейтронщики. Этому в немалой степени способствовало создание в ОРАР собственной



Президент АН СССР А.П.Александров, Б.Н.Гощицкий и С.К.Сидоров на верхней площадке реактора ИВВ-2

криогенной станции с машиной для ожижения гелия. Гелия было море. Это давало возможность не только изучать кристаллические и магнитные структуры при низких температурах, но и освоить на месте весь комплекс низкотемпературных измерений электрофизических и транспортных свойств образцов. Для выполнения этих работ была создана группа под руководством В.Е. Архипова, в которую вошли прямо со студенческой скамьи А.Е. Карькин и С.А. Давыдов, а за освоение приобретённой установки по измерению теплоёмкости взялся А.В. Мирмельштейн. Структурные исследования стали предметом деятельности В.И. Воронина. Изначально эти работы были ориентированы скорее на выявление радиационной стойкости сверхпроводящих материалов, что было важно для разработчиков сверхпроводящих обмоток токамаков и тому подобной техники. Но вскоре выяснилось, что радиационное разупорядочение сверхпроводников позволяет получать уникальную информацию о фундаментальных механизмах этого явления (ранее, ещё в 1969 г. мы уже убедились в возможностях этого метода, исследуя окисные магнетики). В тот период в группе наиболее интенсивно изучались соединения А-15, в которых было открыто и объяснено весьма удивительное явление увеличения температуры сверхпроводящего перехода в облучённых быстрыми нейтронами образцах системы Mo_3Si , что вдобавок сопровождалось аморфизацией её кристаллической структуры. Помимо А-15 исследовали и многие другие соединения: фазы Шевреля, сплавы Nb-Ti и т.п. В результате этих работ был накоплен значительный опыт исследования разнообразных сверхпроводников и, что оказалось чрезвычайно важным, установлены прочные дружеские контакты с коллегами из соседнего Института химии твёрдого

тела, помогавшими с синтезом образцов и преуспевшими в работах с различными оксидами.

Этот опыт сыграл решающую роль, когда в 1986 г. научный мир потрясло открытие высокотемпературной сверхпроводимости. Из молодых сотрудников ЛРФиНС и их друзей из ИХТ молниеносно сформировалась команда, оказавшаяся способной фактически первыми в стране начать исследования этих материалов. Успех удалось развить. Б.Н. Гощицкий сумел привлечь внимание к проблеме ВТСП тогдашнего Председателя Президиума УрО АН СССР Г.А. Месяца. В результате была обеспечена не только локальная поддержка этих исследований, но развёрнута широкая научная кооперация в масштабах всей страны в рамках созданного исследовательского центра «Импульс», функционировавшего под руководством Г.А. Месяца и Б.Н. Гощицкого. В него на тот момент вошли около 40 институтов и предприятий, что позволило, в частности, организовать массовое производство сверхпроводящих образцов и снабдить ими очень многие научные группы. Не случайно, что именно в Заречном летом 1987 г. была проведена первая общесоюзная конференция по ВТСП, что потребовало тогда огромных организационных усилий, поскольку она не входила ни в какие составленные загодя планы научных мероприятий. Удалось даже издать обширный сборник тезисов конференции «Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости», который помог решить очень острую проблему срочной публикации самых первых результатов по этой тематике в стране. Тогда же в ходе наших исследований было установлено, что поведение новых сверхпроводников при их облучении быстрыми



На переднем плане: академик Г.Н. Флеров и профессор С.К. Сидоров

нейтронами кардинально отличается от поведения традиционных сверхпроводящих материалов. Причем обнаруженная в новых сверхпроводниках высокая чувствительность к радиационному разупорядочению напрямую связана с механизмом высокотемпературной сверхпроводимости и может быть использована как основа уникального метода изучения характеристик этих систем, что в дальнейшем определило формирование целого направления исследований ОРАР. Необходимо отметить, что в понимании этих эффектов и становлении данного направления большую роль сыграл молодой сотрудник Института электрофизики (а в недавнем прошлом – Лаборатории теории твёрдого тела ИФМ) М.В. Садовский, специалист по теории разупорядоченных систем и сверхпроводимости, в самый нужный момент счастливо оказавшийся буквально в шаговой доступности. По результатам работ «Эффекты сильного разупорядочения в высокотемпературных сверхпроводниках – теория и эксперимент» в 2002 г. Президиум Российской академии наук присудил членам-корреспондентам РАН Б.Н. Гощицкому и М.В. Садовскому премию имени А.Г. Столетова.

Вспоминая становление подразделения, невозможно обойти стороной историю наших усилий в области неупругого рассеяния нейтронов. Сооружение соответствующего спектрометра предполагалось в самых ранних планах создания академического нейтронного центра. При успехе такой прибор позволял бы напрямую измерять спектры элементарных возбуждений в кристаллах: фононов, магнонов, магнитных экситонов, т.е. открывал бы доступ к информации, касающейся самых фундаментальных механизмов



Профессор С.К. Сидоров, зав. Отделом ИЭРЖ УрО РАН Н.В. Куликов, академик С.В. Вонсовский, директор ИФМ УрО РАН М.Н. Михеев, зав. ОРАР Б.Н. Гощицкий и Первый секретарь Свердловского Обкома КПСС Б.Н. Ельцин



Б.Н.Гоцицкий в XXI веке

взаимодействий и явлений в твёрдых телах. Изначально идей было несколько. Но затея с времяпролётным спектрометром «Спин» быстро провалилась в силу несоответствия технической сложности этого прибора уровню доступных нам технологических возможностей. Зато, используя узлы польского дифрактометра КРТ, удалось собрать, в общем, дееспособный трёхосевой спектрометр и начать осваивать методики неупругих измерений. При уровне этого прибора большим успехом было потребовавшее огромных усилий выполнение измерений кривых дисперсии фононов в свинце, в том числе, и при гелиевых температурах, что в начале 70-х годов в нашей стране было существенным достижением. При этом, удалось увидеть даже некие проявления на этих кривых следов сверхпроводящего перехода в свинце – эффект, который в дальнейшем сначала оспаривался, но потом появлялись и публикации в его пользу. В начале тех же 70-х годов в СКБ при ФТИ им. А.Ф. Иоффе получили задание спроектировать и изготовить трёхосевой нейтронный спектрометр «Нейтрон-3» для установки на реакторе в Гатчине. Нам было ясно, что возможности нашего «самопального» прибора исчерпаны. Благодаря связям в нейтронном сообществе удалось протолкнуть решение об изготовлении упомянутой установки в двух экземплярах. И в 1977 г. прибор был смонтирован в Заречном и запущен. Увы, результат нас не обрадовал. Машина по интенсивности сигнала и разрешению оказалась отнюдь не мирового уровня. Причина этого, в значительной степени, заключалась в том, что её проектирование велось «на глазок». Сложной методикой расчёта таких систем проектировщики не владели, да и сама методика была развита совершенно недостаточно. Именно этот факт подтолкнул нас к разработке теории нейтронных спектрометров и дифрактометров – области, где нам удалось достичь общепризнанных успехов. Однако надо отметить, что, несмотря на недостатки, кое-что удалось сделать и на «Нейтрон-3». Но главным положительным эффектом всех этих работ стало формирование группы неупругого рассеяния, куда входили Ю.Н. Михайлов, Ю.С. Поносов, А.В. Мирмельштейн, В.И. Бобровский, И.Л. Ждахин, а несколько позднее – Андрей Подлесняк. К сожалению, в настоящее время ни спектрометра, ни неупругого рассеяния в Заречном больше нет. Пожалуй, единственным утешением является факт, что одним из лучших в мире приборов этого типа, размещённым в Ок-Риджской Национальной лаборатории, управляет доктор Эндрю Подлесняк.

Вообще, приборная эпопея подразделения могла бы стать темой легенд и сказаний. В советское время ни о каком приобретении стандартного готового нейтронного дифрактометра не могло быть и речи. Их просто не было. Несчастливый опыт «Ней-

трона-3» – исключение, подтверждающее правило. В новые времена, в принципе, купить на мировом рынке такую установку можно. Но вот только стоит она не один миллион долларов. Поэтому дифрактометры строились для каждого ГЭКа отдельно по индивидуальным проектам из чего бог послал.

К счастью, эти приборы представляют из себя нечто вроде детского конструктора. Главным было сделать подходящую станину – механическую конструкцию весом в несколько сот килограммов, служившую чем-то вроде оптической скамьи. На ней размещались остальные блоки прибора – монохроматоры, коллиматоры, детекторы и система управления перемещением стрелы дифрактометра. Вот эту обязанку прибора за время его жизни меняли неоднократно, существенно изменяя его возможности и характеристики.

Разработка, реализация и эксплуатация всех этих весьма сложных устройств оказалась возможной только благодаря наличию в штате ОРАР и ЛРФиНС замечательных инженеров, таких как В.Г. Чудинов, П.М. Коротовских, А.И. Козлов, В.В. Чернобровкин, А.А. Красноложкин, В.Ф. Онищенко, Я.С. Хейнштейн, и золотых рук наших рабочих и техников. Тут же необходимо упомянуть и вклад Конструкторского Бюро ИФМ. И, конечно, масса усилий была приложена самими учёными подразделения.

Небезынтересна и история структурных преобразований связки ЛМН – ЛРФиНС. В 1981 г. С.К. Сидоров передал заведование Лабораторией магнитной нейтронографии А.З. Меньшикову, который успешно руководил ею до самой своей безвременной кончины в 2000 г. Его сменил на этом посту Ю.Н. Скрыбин, которого А.З. Меньшиков в 1991 г. перетянул из Лаборатории теории твёрдого тела. А тем временем большой Отдел радиационной физики твёрдого тела в 1987 г. прекратил свое существование, основной причиной чего стала смерть отца-основателя направления С.К. Сидорова. Однако в 1989 г. было понятно, что деятельность нейтронных подразделений всё-таки необходимо координировать.

В связи с этим была проведена реорганизация, в результате которой возник новый (но под использовавшимся ранее названием) большой Отдел работ на атомном реакторе, включивший три подразделения: Лабораторию магнитной нейтронографии; Лабораторию радиационной физики и нейтронной спектроскопии и Лабораторию облучений и нейтронной дифракции с перераспределением между ними как тематик, так и сотрудников прежних ЛМН и ЛРФиНС. Лаборатории магнитной нейтронографии было определено исследовать магнитные структуры, магнитные состояния и фазовые превращения в сплавах и соединениях на основе переходных и редкоземельных материалов. Лаборатория радиационной физики и нейтронной спектроскопии ориентировалась на исследование радиационных эффектов в кри-

сталлических и аморфных магнитных и сверхпроводящих сплавах и интерметаллических соединениях, сверхпроводящих свойств, структуры и электронного строения сплавов и соединений на основе d- и f-переходных металлов. Целью Лаборатории облучений было исследование радиационных эффектов в кристаллических и аморфных конструкционных сплавах и соединениях, электронных свойств, фазовых переходов и атомных магнитных структур в сплавах и соединениях переходных материалов. Большой ОРАР и ЛРФиНС возглавил Б.Н. Гощицкий, ЛМН – А.З. Меньшиков (с 2000 г. – Ю.Н. Скрыбин), ЛОиНД – В.Д. Пархоменко.

В 2005 г. в отставку по возрасту с поста заведующего ОРАР и ЛРФиНС уходит Б.Н. Гощицкий, перемещаясь на пост научного руководителя большого ОРАР. Следствием этого становится объединение ЛМН и ЛРФиНС в Лабораторию нейтронных исследований вещества. В 2006 г. происходит изменение статуса Лаборатории облучений и нейтронной дифракции. Она преобразуется в Группу облучений, оставаясь под руководством В.Д. Пархоменко. В качестве отдельной субъединицы в ОРАР входит теперь и Служба ядерно-физической электроники и автоматизации. Кроме того, к отделу в 2006 г. также присоединяется Группа высоких давлений, перешедшая в ОРАР в поисках благоприятной атмосферы для исследований. С 2005 по 2011 гг. большим ОРАР и ЛНИВ руководит Ю.Н. Скрыбин. В 2012 г. приходит черед его возрастной отставки. На заведование этими подразделениями призывается В.И. Бобровский. Одновременно происходит очередная реструктуризация и переименование большого отдела. Теперь он называется Отделом исследования вещества при экстремальных воздействиях (ОИВЭВ). Это название призвано подчеркнуть наличие в составе отдела бывшей Группы высоких давлений, которая теперь получила новый статус и название «Лаборатория электронных свойств вещества при высоких давлениях», и вновь введенной в состав отдела части Лаборатории диффузии под названием «Лаборатория неравновесных процессов и структур» под руководством В.Б. Выходца. Кроме того, назрела необходимость решения некоторых административно-бюрократических проблем. Например, всё, что находится в городе Заречном, относится к другому территориальному налоговому ведомству, нежели основной институт. Поэтому все зареченские подразделения ОИВЭВ объединяются в единую структурную единицу – Обособленное Подразделение Отдел работ на атомном реакторе. В нём с этого момента числятся только зареченские сотрудники ИФМ. ОИВЭВ и ЛНИВ возглавляет В.И. Бобровский, ОП ОРАР – В.Д. Пархоменко. В 2015 г. большой Отдел вновь переименовывается, получая название «Отдел радиационной физики и нейтронной спектроскопии». Это связано с расформированием входившей в его состав Лаборатории электронных свойств вещества при высоких давлениях, последовавшим после смерти её руководителя В.В. Щенникова, и возвраще-



Наши 90-е годы

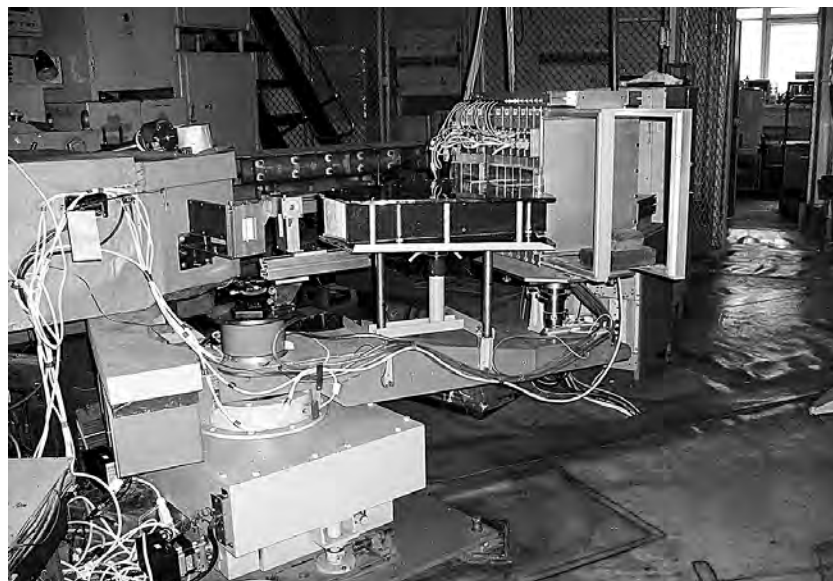
нием его бывших сотрудников вместе с тематикой в Лабораторию полупроводников и полуметаллов. Из состава ОИВЭВ выводится также Лаборатория неравновесных процессов и структур, вливаемая в Лабораторию нанокompозитных мультиферроиков.

История ОРФиНС осталась бы неполной без, хотя бы беглого, описания его взаимоотношений с Институтом реакторных материалов, на территории которого и пребывает ОП ОРАР. По завершении строительства нейтронного комплекса в 1969 г. между Министерством среднего машиностроения и Академией наук СССР было заключено Соглашение, устанавливавшее право использования Институтом физики металлов ряда экспериментальных устройств и площадей, которое обеспечило бесконфликтное функционирование этого подразделения ИФМ в течение нескольких десятилетий. Естественно, при этом ежегодно Институтом физики металлов оплачивались эксплуатационные расходы. Однако в 2009 г. было проведено акционирование СФ НИКИЭТ, в результате чего эта организация преобразовалась в АО «Институт реакторных материалов» Госкорпорации «Росатом», а ИФМ УрО РАН превратился в арендатора площадей и технических услуг (нейтронных пучков реактора ИВВ-2М), стоимость которых определяется владельцем на рыночной основе.

Поскольку в исследованиях, проводимых в ОРФиНС, весьма заинтересованы и другие академические институты, Президиум УрО РАН до 2014 г. оказывал финансовую поддержку нашей деятельности, в значительной степени покрывая расходы на содержание ОП ОРАР. ИФМ УрО РАН необходимо оплачивать: арендную плату, затраты на содержание помещений (коммунальные услуги, эксплуатационные, административно-хозяйственные

расходы и т.п.), а также часть затрат на эксплуатацию реактора (формирование стабильных нейтронных пучков для исследований, проводимых нами в области физики конденсированного состояния). В частности, на 2014–2016 гг. на эти цели Президиумом УрО РАН были запланированы ежегодные субсидии в объёме 5260 тыс. рублей. Условием получения такой финансовой поддержки было безвозмездное предоставление академическим, а также учебным институтам возможностей проведения нейтронографических исследований на наших установках, что соблюдалось в течение всей нашей истории. Однако в связи с реформой РАН уже в 2014 г. эта поддержка не выделялась. Эти обстоятельства создали значительные финансовые трудности в функционировании ОП ОРАР.

Методы, основанные на использовании потоков тепловых и быстрых нейтронов, предоставляют уникальные возможности для получения научной информации. Проведение структурных исследований вещества нейтронными методами оказывается возможным благодаря тому, что дебройлеровская длина волны тепловых нейтронов сопоставима с межатомными расстояниями в конденсированных средах. По этому параметру нейтроны идентичны рентгеновским лучам. Вместе с тем, в силу специфических особенностей нейтронного излучения, его использование существенно дополняет и расширяет возможности рентгеновской дифракции. Прежде всего – это наличие у нейтрона магнитного момента, что делает его незаменимым инструментом в изучении магнитных структур, давая возможность прямого определения строения магнитных решёток и величин магнитных моментов на слагающих их



Нейтронный дифрактометр высокого разрешения Д-7а. Видны поворотный механизм и стрела с установленным на ней многоканальным детектором нейтронов

атомах. Другое важное отличие нейтронов от рентгеновских лучей заключается в нерегулярной зависимости величины амплитуды рассеяния нейтронов от атомного номера химического элемента. Благодаря этому, методом нейтронной дифракции можно исследовать сплавы и соединения, содержащие химические элементы с близкими атомными номерами, или позиционировать лёгкие элементы на фоне тяжёлых.

Уникальным обстоятельством является также то, что энергия тепловых нейтронов близка к энергии элементарных возбуждений в кристаллах: фононов, магнонов, магнитных экситонов. Это позволяет в экспериментах по неупругому рассеянию тепловых нейтронов определять спектры элементарных возбуждений, что принципиально важно для изучения тонких деталей механизмов взаимодействий в твёрдых телах.

И, наконец, высокая проникающая способность нейтронных пучков даёт возможность проводить исследования избранных участков внутри объёмов массивных образцов, перемещая в них с помощью диафрагм области наблюдений. Таким образом, например, можно изучать внутренние напряжения в реальных изделиях, причём в условиях приложения к ним внешних нагрузок и при различных температурах.

В ОРФиНС ведётся изучение эффектов, вызванных облучением различных материалов потоками быстрых нейтронов (радиационное разупорядочение атомного масштаба). При этом, в отличие от заряженных частиц (ионов, электронов), нейтроны обеспечивают практически макрооднородное по объёму облучение массивных образцов. Помимо того, что такое воздействие является следствием эксплуатации материалов в технике специального назначения, оно может играть роль уникального технологического приёма, позволяющего получать состояния вещества, зачастую, недостижимые никакими другими методами. Изучение отклика кристаллов на такое воздействие даёт возможность получать уникальную информацию об особенностях их электронной и решёточной подсистем, определяющих экстремальные физические свойства вещества в исходном, необлучённом состоянии. При этом очень эффективным способом изучения трансформаций структурного состояния облучённых быстрыми нейтронами веществ является метод дифракции тепловых нейтронов.

В настоящее время использование нейтронографических методов стало стандартным, а зачастую, обязательным методом при разработке новых материалов и технологий их изготовления. Всего в мире насчитывается около 40 научных центров, ведущих исследования с использованием нейтронных пучков. В Советском Союзе действовали пятнадцать ядерных центров, в которых велись нейтронографические исследования (десять – в институтах АН СССР). В настоящее время из них функционируют только три, находящиеся в Объединённом Институте Ядерных Исследований

(Дубна), НИЦ «Курчатовский Институт» (Москва), Институте физики металлов УрО РАН (Заречный). Созданный нами на реакторе ИВВ-2 (после модернизации – ИВВ-2М) набор экспериментальных установок образует Нейтронный материаловедческий комплекс ИФМ УрО РАН на реакторе ИВВ-2М (НМК ИФМ УрО РАН), который является последним оставшимся нейтронографическим центром Российской академии наук и единственным в РФ, где ведутся работы с высокорadioактивными образцами облучённых материалов. Следует отметить, что и в мировой практике такие исследования крайне редки.

ИФМ УрО РАН является базовой организацией Научного совета ОФН РАН по проблеме «Радиационная физика твёрдого тела», возглавляемого членом-корреспондентом РАН Б.Н. Гошциким, являющимся также научным руководителем работ в НМК ИФМ УрО РАН.

В 2015 г. Нейтронный Материаловедческий Комплекс ИФМ УрО РАН по результатам ранжирования ЦКП, УНУ и СКЦ, проведённым ФАНО РФ, был включен в список уникальных установок I-ой категории.

Неотъемлемой частью нашей деятельности все эти годы была и научно-организационная активность. Помимо уже упоминавшихся нейтронных Совещаний в Заречном, а также конференции «Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости», обязательно следует назвать и наше первое международное мероприятие – конференцию 1990 г. «Effects of strong disordering in HTSC», когда впервые к нам в Заречный приехали коллеги из Германии, Швейцарии, Франции, Нидерландов, Польши, Румынии, Китая и Японии. Это был прорыв, положивший начало развитию широких международных связей, причём не только для наших сотрудников, но и для участников из других институтов СССР. А следующим шагом было основание в 1995 г. (совместно с коллегами из Снежинска) уже регулярного Международного Уральского Семинара «Радиационная физика металлов и сплавов». В 2017 г. он был проведён уже в двенадцатый раз.

В 2017 г. персонал ОРФиНС насчитывает 15 научных и 20 инженерно-технических работников, включая 3-х докторов (из них 1 чл.-корр. РАН) и 11 кандидатов физико-математических наук. В эпоху расцвета штат подразделения составлял почти 100 человек.

На пучках тепловых и быстрых нейтронов атомного реактора ИВВ-2М методами рассеяния тепловых нейтронов, радиационного разупорядочения и общезначимыми методами мы проводили широкие исследования материалов различного состава и назначения (металлов, сплавов, соединений, наноматериалов) в следующих основных направлениях:

- Нейтронографические исследования функциональных материалов с целью улучшения их эксплуатационных свойств



Наши техники и лаборанты: В.А.Шибалов, А.Ю.Федотов, А.В.Бадьин, В.Н.Паньшин. Эти парни могли все и среди сельхозтехники подшефного совхоза Храмцово чувствовали себя столь же уверенно, как и у атомного реактора

(конструкционные стали, нанокристаллические системы, твёрдые электролиты, диэлектрики и т.п.);

- Свойства материалов, облучённых быстрыми нейтронами, в том числе, перспективных для применения в ядерной и термоядерной индустрии и энергетике;
- Радиационная модификация материалов с целью направленного изменения их свойств;
- Физические механизмы формирования экстремальных свойств материалов (высокотемпературная сверхпроводимость, гигантское магнитосопротивление, суперионная проводимость, фрактальность наносистем и т.п.);
- Магнитные структуры и фазовые переходы сплавов и соединений на основе редкоземельных и переходных металлов.

За почти полувековую деятельность подразделения было исследовано огромное количество самых разных материалов. Только за последние 10 лет (2007–2016 гг.) нашими сотрудниками было опубликовано около 230 статей в отечественных и зарубежных научных журналах и сделано 280 докладов на различных научных конференциях. Наиболее крупные публикации ОРФиНС обзорного характера приведены в конце статьи [1–6].

Чтобы дать более наглядное представление о наших работах, ниже описаны несколько направлений исследований последнего пятилетия.

Безопасность атомных энергетических установок и ресурс их работы в значительной степени определяются используемыми

конструкционными материалами. Дegrаdация их первоначальных физико-механических свойств происходит вследствие изменений в структуре и составе материалов, как в результате облучения, так и вследствие термического старения при рабочих температурах реакторов. Создание конструкционных материалов для элементов ядерных и термоядерных реакторов представляет собой исключительно серьёзную проблему. Для решения её необходимы знание механизмов взаимодействия быстрых нейтронов с веществом, возможность предсказания поведения материалов и оценка времени сохранения механических свойств. Уже проведённые исследования реакторных сталей показали, что под облучением в них развиваются сложные процессы, многие детали которых к настоящему времени поняты далеко не до конца, что затрудняет осознанный поиск решения задач создания радиационно-стойких сталей.

На сегодняшний день основным конструкционным материалом активной зоны реакторов на быстрых нейтронах являются обладающие ГЦК-структурой аустенитные стали. Для выяснения фундаментальных механизмов радиационных повреждений ГЦК-материалов в ОРФИС предпринято систематическое комплексное исследование механизмов радиационных повреждений в этих системах. Последовательно проведены исследования радиационных эффектов в модельных ГЦК-системах (чистом и слаболегированном никеле, железо-никелевых сплавах), в аустенитных реакторных сталях с различными типами старения (карбидным и интерметаллидным), а также в образцах сталей ЧС68 и ЭК164, вырезанных из реальных оболочек тепловыделяющих элементов после длительной эксплуатации в составе топливных сборок энергетического реактора на быстрых нейтронах БН-600. Следует подчеркнуть, что последние исследования абсолютно уникальны и оказались возможными только благодаря тесной кооперации БАЭС-ИРМ-ИФМ и их территориальному расположению, позволившему решить проблемы транспортировки высокоактивных образцов.

Было установлено, что под облучением быстрыми нейтронами в этих материалах развиваются конкурирующие процессы. С одной стороны, это радиационно-стимулированная релаксация микронапряжений, которая происходит в результате диффузии атомов и аннигиляции исходных дислокаций, и эта релаксация аналогична процессам диффузионного отжига при термическом воздействии. Этот процесс приводит к понижению микроискажений в материале. Второй, альтернативный процесс – это создание радиационных дефектов в виде точечных дефектов, их скоплений и кластеров, а также в виде дислокационных петель, что вызывает рост микроискажений решётки. Идёт радиационная рекристаллизация материала, проявляющаяся в изменении его текстурированности и размеров областей когерентного рассеяния. Дан-

ные наших исследований, выполненных на уникальной подборке образцов, вырезанных из одного тепловыделяющего элемента, но эксплуатировавшихся в разных участках активной зоны, напрямую подтверждают важнейшую роль температурных условий облучения в радиационном поведении реакторных сталей.

К настоящему времени экспериментально установлено, что облучение быстрыми нейтронами приводит к аморфизации ряда сплавов, интерметаллидов и оксидов. Среди таких объектов – вещества с интересными магнитными, сверхпроводящими, механическими и другими свойствами. Структурные превращения кристалл – аморфное твёрдое тело могут приводить к радикальному изменению физических свойств. Метод радиационной аморфизации, базирующийся на облучении материала быстрыми нейтронами, сохраняет неизменным химический состав образца и даёт возможность получать термодинамически неравновесные структурные состояния, в том числе и аморфные, которые, как правило, трудно получить другими методами.

Методами нейтронной и рентгеновской дифракции нами были исследованы образцы типичных представителей оксидов со структурой граната на основе $Y_3Fe_5O_{12}$ с частичным замещением ионов железа на ионы скандия, а ионов иттрия на ионы гадолиния и окисных перовскитообразных манганитов $La_{1-x}Ba_xMnO_3$, облучённых различными флюенсами быстрых нейтронов в реакторе ИВВ-2М. Отметим, что все эти материалы представляют не только теоретический, но и значительный практический интерес, поскольку широко используются в современной электронике. Нами было установлено, что при облучении быстрыми нейтронами окисных соединений основным физическим процессом является статистическое перераспределение различных катионов по неэквивалентным узлам кристаллической решётки, т.е. образование антиузельных дефектов, что приводит к значительным неоднородным смещениям близлежащих ионов кислорода. Было выяснено, что радиационное поведение этих материалов является примером твердотельной аморфизации в результате накопления критической концентрации дефектов в кристалле, существенно отличающейся по величине для разных материалов. При этом оказалось, что некая предельная концентрация антиузельных дефектов образуется уже при однократном воздействии каскада атомных смещений на участок кристалла. Было показано, что информативной характеристикой процесса аморфизации этих оксидов являются величины средних по кристаллу статических смещений ионов кислорода, отнесённых к ближайшим расстояниям между катионами и ионами кислорода. Было установлено, что аморфизация весьма различающихся между собой ферритов-грантов и перовскитов наступает при близких значениях этого параметра, причём это значение соответствует известному критерию плавления Линдемана. Т.е. было показано, что кристаллы теряют стабильность

при примерно одинаковых величинах параметра, как при статическом, так и при динамическом сценарии. Этот факт можно рассматривать как дополнительное доказательство того, что потеря устойчивости кристаллической решётки в результате облучения носит не локальный, а глобальный характер.

Нами впервые получено аморфное состояние сплавов $R_2Fe_{14}B$ (где $R=Nd$, и Er) с помощью высокодозового облучения быстрыми нейтронами. Важно, что сплавы $Nd_2Fe_{14}B$ и $Er_2Fe_{14}B$ различаются типами магнитного порядка: первый образец – рекордный ферромагнетик, во втором образце реализуется ферримагнитное упорядочение магнитных моментов Er - и Fe -ионов. Поэтому, изучая их, можно выяснить влияние аморфизации на магнитные свойства материалов $R-Fe-B$ в зависимости от типа магнитного порядка. Следует отметить, что исследование влияния нейтронного облучения на сплавы $R-Fe-B$ представляет и самостоятельный интерес, так как постоянные магниты на основе фазы $Nd_2Fe_{14}B$ широко используются в технике специального назначения. Нами установлено, что в радиационно-аморфизованном состоянии сплавов $Nd_2Fe_{14}B$ и $Er_2Fe_{14}B$ коэрцитивная сила практически равна нулю, т.е. их удалось перевести в магнито-мягкое состояние.

В последние три десятка лет был открыт целый ряд «необычных» сверхпроводников (СП), включающий в себя системы с тяжёлыми фермионами, высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) на основе меди или железа, множество различных систем с относительно низкой концентрацией носителей заряда (легированные полупроводники), Sr_2RuO_4 и т.д. Выяснение реализующихся в них механизмов сверхпроводимости является одной из важнейших проблем современной физики твёрдого тела. В ОРФиНС в течение более 25 лет развивался оригинальный метод контролируемого внесения немагнитных структурных дефектов в сверхпроводящие материалы с помощью облучения быстрыми нейтронами, позволяющий делать заключения относительно упомянутых механизмов. В отличие от традиционных материалов, немагнитное рассеяние является распаривающим в случае «необычных» сверхпроводников, для которых квазичастицами, приводящими к куперовскому спариванию электронов, вместо фононов служат магнитные возбуждения. Высокая чувствительность к немагнитному беспорядку – общее свойство необычных СП, которое проявляется также и для других экзотических типов спаривания, например, триплетного в случае соединения Sr_2RuO_4 и, вероятно, многих других. Таким образом, изучение влияния немагнитного беспорядка на свойства сверхпроводников позволяет выявить, относится данное соединение к обычным СП с электрон-фононным механизмом сверхпроводимости, или к необычным СП с экзотическим (нефононным) взаимодействием, приводящим к спариванию электро-

нов ниже T_c . Подчеркнём, что наш подход заключается в сравнении комплекса экспериментально наблюдаемых изменений свойств нормального и сверхпроводящего состояний с предсказаниями существующих теоретических моделей и получении таким образом доводов в пользу той или иной модели. В последний пятилетний период таким исследованиям нами были подвергнуты новые сверхпроводники систем: $Ba(Ca)-Fe(Co)-As$, $Sc-Ir-i$, $La-Pt-Ge$, $Ln-Ni-B-C$ ($Ln=Lu, Y, Er, Ho$), $La-Ru-Si$, Mo_3Al_2C с предполагаемым аномальным типом спаривания. Было показано, что в соединениях $BaFe_{2-x}Co_xAs_2$, $CaFe_{2-x}Co_xAs_2$, $FeSe$, $Lu_2Fe_3Si_5$, $LaPt_4Ge_{12}$ и $Sc_5Ir_4Si_{10}$ облучение приводит к полному подавлению сверхпроводимости, причём скорость понижения T_c значительно (примерно в 5 раз) меньше, чем это следует из модели Абрикосова-Горькова. Наблюдаемое поведение сверхпроводимости в YNi_2B_2C при облучении указывает на то, что это соединение относится к необычным сверхпроводникам со знакопеременной сверхпроводящей щелевой функцией. Тем самым подтверждено, что быстрая и полная деградация сверхпроводимости при разупорядочении при отсутствии существенного изменения зонных параметров, таких как плотность электронных состояний и др., характерная для систем с аномальным типом спаривания, имеет место не только для Cu - и Fe -содержащих высокотемпературных сверхпроводников и систем с тяжёлыми фермионами, но и для некоторых других 3-х или 4-х компонентных сверхпроводящих соединений.

Гигантский прогресс в области ёмкости жёстких дисков компьютеров был обеспечен появлением нового поколения сверхчувствительных магнитных головок, действие которых основано на спиновой поляризации тока. Большой интерес для разработки подобных приборов представляют полупроводники, которые обладали бы дальним магнитным порядком. Одно из направлений поиска таких веществ является синтез разбавленных магнитных полупроводников (РМП). Целью наших исследований было получение с помощью нейтронно-дифракционных методов данных об особенностях структурного состояния и физических свойств широкозонных полупроводников с 3d-ионами. Нами установлено, что в реальной кристаллической структуре слабо легированных 3d- примесью кристаллов соединений $Zn_{1-x}M_xB^{VI}$ ($B^{VI} = O, S, Se, Te$; $M = V, Cr, Fe, Co, Ni$) в окрестности 3d- иона при несферичности его недостроенной d- оболочке формируются массивы беспорядочных искажений, обусловленных сдвиговыми атомными смещениями. В кристаллах соединений с основным структурным мотивом цинковой обманки $Zn_{1-x}M_xS$ (Se) ($M = V, Fe, Ni$; $x \sim 0,05 \div 0,10$) и $Zn_{0,997}Ni_{0,003}Te$ с высоким уровнем легирования установлены проявления тенденций к формированию политипов и к полному разупорядочению в укладке двойных плотноупакованных атомных слоёв.

В настоящее время ведётся широкая разработка химических источников тока, в которых в качестве электродных материалов используются суперионники – материалы со смешанной ионно-электронной проводимостью. Такие твёрдые электролиты характеризуются наличием разупорядоченной подрешётки ионов проводимости, помещённой в жёсткий каркас остальных ионов. Предполагается, что их высокая проводимость обусловлена аномально быстрой ионной диффузией, которая носит кооперативный характер благодаря геометрическим особенностям структуры, допускающим быструю одно-, двух- или трёхмерную диффузию определённого сорта ионов. Но следует признать, что природа формирования суперионного состояния твёрдых электролитов всё ещё относится к числу важных нерешённых проблем физики и химии твёрдого тела. Большой интерес представляют данные о структуре этих систем в широком диапазоне температур с установлением корреляцией между структурными и проводящими свойствами. Эффективным методом исследования твёрдых электролитов является структурная нейтронография, поскольку благодаря большой проникающей способности нейтронов и значительной величине амплитуд рассеяния лёгких элементов легко создаются условия для высокотемпературных экспериментов. В настоящее время лидером по интересу являются твёрдые электролиты, содержащие оксиды лития. В течение последних лет мы дополнили выполненные нами ранее исследования ортогерманатов лития составов $\text{Li}_{3,75}\text{Ge}_{0,75}\text{V}_{0,25}\text{O}_4$ и $\text{Li}_{3,70}\text{Ge}_{0,85}\text{W}_{0,15}\text{O}_4$ и метацирконата лития Li_2ZrO_3 исследованием дифосфата лития $\text{Li}_4\text{P}_2\text{O}_7$ и оксида на основе $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ (LLZ) с иным типом кристаллических решёток. С другой стороны, мы выполнили высокотемпературные исследования твёрдых электролитов с общей формулой $\text{A}_{1-x}\text{M}_{1-x}\text{Z}_x\text{O}_4$ ($\text{A} = \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$; $\text{M} = \text{Al}, \text{Fe}, \text{Ga}$; $\text{Z} = \text{Si}, \text{Ti}, \text{Ge}$), получаемых гетеровалентным допированием близких по структуре соединений AMO_2 ($\text{A} = \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$; $\text{M} = \text{Al}, \text{Fe}, \text{Ga}$), которые имеют очень высокую проводимость по катионам щелочных металлов A^+ . В результате уточнена кристаллическая структура этих соединений в широком интервале температур, изучены протекающие в них структурные переходы и установлены каналы миграции щелочных ионов.

Магнитные свойства статистически упорядоченных систем и фазовые переходы в них являются объектами многих экспериментальных и теоретических исследований. Но наиболее интересными из них представляются системы с конкурирующими взаимодействиями, такие как, например, ферро- и антиферромагнитные взаимодействия, обменная связь Рудермана-Киттеля-Касуйя-Иосиды и взаимодействие с кристаллическим электрическим полем, магнитокристаллическая анизотропии типа «лёгкая ось – лёгкая плоскость», магнитная и ферроэлектрическая степени свободы в ферроэлектриках. Конкуренция взаимодействий проявляется в ряде ярких эффектов, таких как скошенные и несоизмеримые

магнитные структуры, спин-переориентационные переходы, процессы намагничивания первого рода, волны зарядовой плотности и др. Нейтронографическими методами нам удалось установить большое своеобразие картины магнитных фазовых переходов в интерметаллидах TbNi_5 и $\text{Tb}_{0,95}\text{Er}_{0,05}\text{Ni}_5$, возникающих как следствие существующих в них конкурирующих магнитных взаимодействий. Один переход, второго рода, происходит при температуре T_c , где разрушается дальний магнитный порядок. Другой переход, первого рода, происходит при T_i , при которой наблюдается переход типа несоизмеримая – «lock-in» структуры. Изучены структурные и магнитные явления, сопровождающие эти переходы.

Взросший в последнее время интерес к демонстрирующим гигантский магнитокалорический эффект интерметаллидам, (ГМКЭ), обусловлен возможностью создания на их основе высокоэффективных, экологически безопасных магнитных холодильников нового типа. ГМКЭ с рекордным значением относительной охлаждающей мощности и слабым гистерезисом при перемагничивании был обнаружен в соединении Ho_5Pd_2 . Применение комплексного подхода, включающего в себя измерение магнитной восприимчивости в постоянных и переменных магнитных полях, теплоёмкости, упругого рассеяния нейтронов, измерение изотерм намагниченности в полях до 90 кОе, позволило нам установить магнитную фазовую диаграмму для целого ряда редкоземельных интерметаллидов типа R_5Pd_2 ($\text{R} = \text{Ho}, \text{Tb}, \text{Er}, \text{Gd}$). Впервые было показано, что во всех соединениях группы R_5Pd_2 при понижении температуры реализуется сложное неэргодичное магнитное состояние типа «кластерное стекло», которое, очевидно, и является ответственным за гигантский магнитокалорический эффект.

Приведёнными примерами тематика наших работ последних лет далеко не исчерпывается. Более полно она представлена в обзоре «Нейтронный материаловедческий комплекс ИФМ УрО РАН на реакторе ИВВ-2М.pdf», посвящённом деятельности Уникальной научной установки НМК ИФМ УрО РАН в 2011–2016 гг. и размещённом на сайте Института.

Завершая статью, считаем своим долгом выразить нашу глубокую благодарность коллегам из других подразделений института, в тесном сотрудничестве с которыми были выполнены многие из наших исследований.

В.И. Бобровский, Б.Н. Гощицкий, В.Д. Пархоменко, Ю.Н. Скрабин

Список литературы

1. Ю.А. Изюмов, Р.П. Озеров, *Магнитная нейтронография*, Наука, Москва, (1996), 532 с.

2. Б.Н. Гощицкий, А.Н. Мень, И.А. Синицкий, Ю.Г. Чукалкин, *Структура и магнитные свойства окисных магнетиков, облученных быстрыми нейтронами*, Наука, Москва (1986), 177 с.
3. С.А. Александров, В.Е. Архипов, Б.Н. Гощицкий, В.Е. Елесин, *Влияние облучения на физические свойства перспективных сверхпроводников*, Энергоатомиздат, Москва, (1989), 233 с.
4. A.E. Karkin, B.N. Goshchitskii, *Physics of Particles and Nuclei* **37**, 807 (2006).
5. Ю.Н. Скрыбин, ТМФ **168**, 551 (2011).
6. В.И. Бобровский и др., <http://imp.uran.ru/?q=ru/content/neytronnyy-materialovedcheskiy-kompleks-instituta-fiziki-metallov-uro-ran-na>

ОТДЕЛ

теоретической и математической физики

ЛАБОРАТОРИЯ

квантовой теории
конденсированного
состояния

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

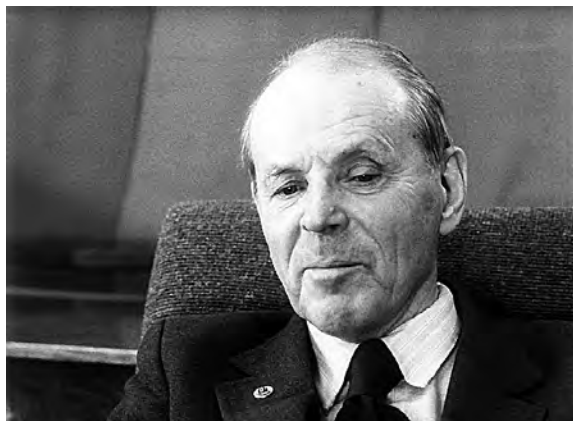
- Ирхин Валентин Юрьевич, *заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.*
- Анохин Анатолий Олегович, *научный сотрудник*
- Журавлев Андрей Константинович, *старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.*
- Зарубин Александр Владимирович, *старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.*
- Игнатенко Андрей Николаевич, *научный сотрудник*
- Игошев Петр Алексеевич, *старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.*
- Кассан-Оглы Феликс Александрович, *главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.*
- Прошкин Алексей Игоревич, *младший научный сотрудник*
- Садовский Михаил Виссарионович, *главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., академик РАН*

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ квантовой теории конденсированного состояния

Лаборатория квантовой теории конденсированного состояния ИФМ УрО РАН является преемником лаборатории теории твёрдого тела, созданной выдающимся российским физиком Юрием Александровичем Изюмовым (1933–2010) в 1974 г., когда его группа выделилась из лаборатории магнитной нейтронографии. Это произошло по инициативе основоположника Сергея Васильевича Вонсовского (1910–1998), который стоял у истоков создания Института физики металлов в Свердловске.

В более общем контексте, лаборатория продолжает богатые традиции научной школы по квантовой теории твёрдого тела, заложенные С.В. Вонсовским и его учителем С.П. Шубиным, которые принесли на Урал традиции российской интеллигенции. С.В. Вонсовский окончил Ленинградский университет в 1932 г. Он благодарно вспоминал В.И. Смирнова, О.Д. Хвольсона, В.А. Фока, П.И. Лукирского и других своих преподавателей в ЛГУ. После окончания учёбы его направили в Свердловск – в Уральский физико-технический институт, где приступил к работе под руководством молодого профессора Семёна Петровича Шубина (1908–1938).

Скоро появились общие статьи Шубина и Вонсовского по полярной модели металлов и полупроводников [1], которая была предложена как синтез гомеоплярной модели Гейзенберга, описывающей систему локализованных моментов, и метода Слэтера для описания электронной системы металла. Этот подход позволял одновременно описывать электрические и магнитные свойства веществ. В кристалле, где на атом приходится один электрон, он означает учет полярных состояний – джок и дырок, т.е. дважды занятых и пустых узлов, и ведёт к физически наглядной картине.



С.В. Вонсовский

В исходной формулировке модели были учтены перескоки электронов с узла на узел, а также все типы межэлектронного взаимодействия.

Эти работы, заложившие основы многоэлектронной физики твёрдого тела, выполнены путём трудных и громоздких вычислений (удобного метода вторичного квантования в то время ещё не было). Они опубликованы в престижном журнале английского Королевского общества и в харьковском журнале «Phys. Zs. UdSSR» на немецком языке. Тем не менее они остались во многом недооценёнными, в каком-то смысле опередив своё время. Идеи, содержащиеся в них, затем переоткрывались и развивались за рубежом (здесь следует отметить знаменитую модель Хаббарда, являющуюся частным случаем полярной модели).

В 1937 г. Шубин был арестован в ходе репрессий и вскоре погиб на Колыме, Вонсовский продолжал развитие общих идей. Работы Вонсовского в области квантовой теории твёрдого тела, особенно многоэлектронной теории металлов и полупроводников, теории ферро- и антиферромагнетизма, сверхпроводимости получили мировое при-

знание. В 1946 г. он предложил s-d-обменную модель [2, 3], основанную на совместных обсуждениях с Шубиным. В отличие от полярной модели, в s-d-обменной модели существование локализованных магнитных моментов не выводится, а постулируется; при этом подсистемы, ответственные за магнетизм и электропроводность разделены: коллективизированные «s-электроны» являются подвижными, а локализованные «d-электроны» дают главный вклад в магнитный момент. Исходно модель s-d-обмена была построена для d-металлов, где она даёт лишь полуфеноменологическую картину, однако её постулаты оказались даже лучше обоснованы для систем с f-электронами, обычно хорошо локализованными.

Позже s-d-модель использовалась для описания ряда d- и f-соединений, например, так называемых «систем с тяжёлыми фермионами», которые сейчас интенсивно изучаются. Удивительно плодотворной она оказалась и для магнитных полупроводни-

ков. В дальнейшем близкие представления были использованы для теоретического описания манганитов с гигантским магнитосопротивлением на основе LaMnO_3 .

Судьба s-d-модели оказалась очень интересной и непростой, в некотором смысле даже драматической. В истории физики она выступала в разнообразных ипостасях. В последнее время в зарубежной физической литературе s-d-модель часто именуется моделью «решёток Кондо». Такая историческая несправедливость связана с исключительной важностью эффекта Кондо – пожалуй, самого красивого явления в физике твёрдого тела. Тем не менее сам Кондо, исследуя аномалии магнитного s-d-рассеяния, исходил из гамильтониана в представлении вторичного квантования, который был предложен Вонсовским и Туровым [4].

Большинство уральских физиков-теоретиков прошлого века считали С.В. Вонсовского своим учителем. Большое внимание ему приходилось уделять и организационной работе. При его активном участии в ИФМ были начаты работы по нейтронографии, физике низких температур, радиационной физике, теории дислокаций...

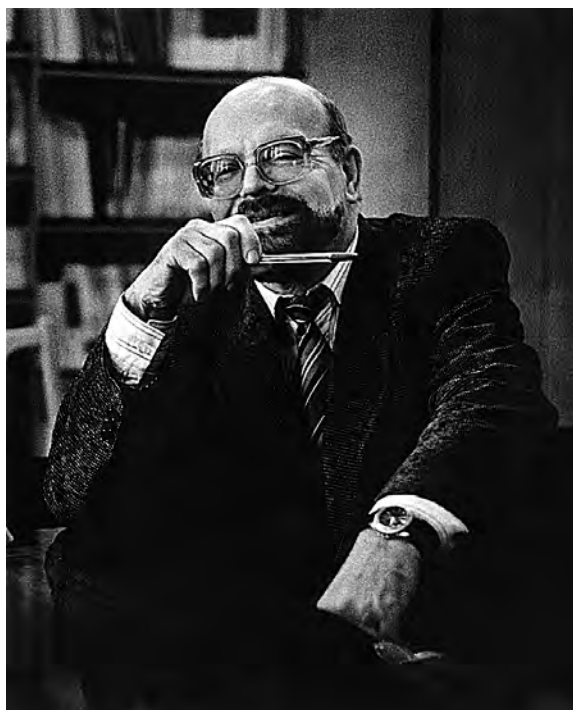
Ю.А. Изюмов поступил в аспирантуру при кафедре теоретической физики УрГУ им. Горького к С.В. Вонсовскому. После её окончания в 1960 г. он защитил кандидатскую диссертацию «Некоторые вопросы спин-волновой теории ферромагнетизма». С 1959 г. и до конца жизни Юрий Александрович работал в Институте физики металлов УрО РАН, куда его пригласил Вонсовский. В 1967 г. защитил докторскую диссертацию, в 1991 г. был избран членом-корреспондентом РАН, а в 2006 г. – действительным членом РАН.

Самостоятельная научная работа Юрия Александровича началась с развития теории рассеяния медленных нейтронов в магнитных кристаллах. Эта тема была одной из основных для созданной в ИФМ по инициативе С.В. Вонсовского лаборатории магнитной нейтронографии, куда был направлен Изюмов. Используя исследовательский реактор ИВВ-2М, сотрудники лаборатории изучали структуру и динамику сверхпроводящих и магнитных материалов, неупорядоченных кристаллов, в том числе после радиационного воздействия.

Эти исследования нуждались в теоретической поддержке. Ю.А. Изюмовым с сотрудниками были разработаны теоретические основы нейтронографии и нейтронной спектроскопии магнетиков: создана теория рас-



Ю.А. Изюмов в костюме доктора Оксфордского университета, 1965 г.



Ю.А. Изюмов

сеяния нейтронов в магнитных кристаллах с широким использованием магнитной симметрии (аппарата представлений пространственных групп) и предложены эффективные методы расшифровки магнитных структур и спектров магнитных возбуждений. Эти методы широко применяются в нейтронографических центрах по всему миру. В 1966 г. вышла в свет «Магнитная нейтронография» [5], которая была первой в мире монографией по этой тематике. Она была вскоре переведена на английский и стала настольной книгой для многих экспериментаторов. В дальнейшем Ю.А. Изюмов продолжил исследования по теории симметрии вместе с В.Е. Найшем и В.Н. Сыромятниковым; вместе с соавторами он опубликовал ещё несколько монографий по вопросам рассеяния нейтронов в твёрдых телах. В 1986 г. Ю.А. Изюмов в составе авторского коллектива был удостоен Государственной премии СССР за создание теории поляризованных нейтронов на сложных магнитных структурах.

Ю.А. Изюмовым с коллегами был выполнен также цикл работ по теории фазовых переходов в магнитоупорядоченных кристаллах, который обобщён в монографии [6], изданной в Советском Союзе и за рубежом. В частности, была разработана идея обменных мультиплетов в приложении к переходам в магнитных системах.

Большое внимание Юрий Александрович уделял исследованию сверхпроводимости d-систем. В книге [7], ставшей классической, была в частности проанализирована проблема сосуществования сверхпроводимости и ферромагнетизма. В конце жизни Ю.А. Изюмов вернулся к этой проблеме и совместно с казанскими коллегами развивал теорию F/S-систем, образованных из слоёв ферромагнетика и сверхпроводника.

Важным направлением исследований Ю.А. Изюмова была квантовая теория магнетизма. В 1960-х годах в сотрудничестве с М.В. Медведевым он построил теорию магнитоупорядоченных кристаллов с примесями, предсказал квазилокальное состояние в магнетонном спектре кристалла со слабо связанным примесным атомом [8].

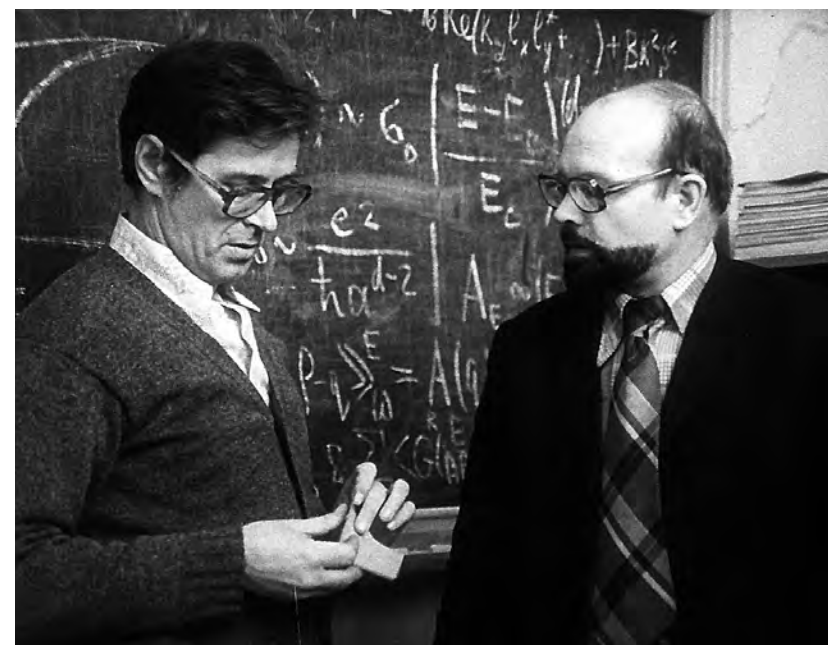
Ю.А. Изюмов внёс большой вклад и в развитие модельной теории магнитных систем. Ещё в аспирантских работах под руко-

водством Вонсовского он исследовал спектр взаимодействующих электронов и спиновых волн в d- и f-металлах в рамках s-d-обменной модели [9]. В конце 1960-х годов он с коллегами развил вариант диаграммной техники для спиновых операторов, изложенный в монографии в соавторстве с Ф.А. Кассан-Оглы и Ю.Н. Скрябиным [10], а в дальнейшем (при активном участии Ю.Н. Скрябина) большое внимание уделял развитию и других теоретико-полевых методов [11].

Много сил Юрий Александрович отдал популяризации многоэлектронной модели Хаббарда, когда она приобрела новую актуальность в связи с открытием высокотемпературной сверхпроводимости [12,13]. Он сам активно работал в этой области: занимался разработкой диаграммной техники для X-операторов Хаббарда в применении к сильно коррелированным электронным системам, в том числе к теории двойного обмена в манганитах (совместно Б.М. Летфуловым, рано ушедшим из жизни).

В последние годы Ю.А. Изюмов успешно сотрудничал со специалистами ИФМ, занимающимися зонными расчётами, особенно в связи с развитием и применением нового подхода для анализа сильно коррелированных систем – динамической теорией среднего поля (DMFT). Результаты этих исследований приведены в монографии [14].

Для стиля научной деятельности Ю.А. Изюмова характерно стремление к обобщению материала во всех областях, где он ра-



В.Е. Найш, Ю.А. Изюмов



Ю.А. Изюмов, В.М. Лаптев, С.Б. Петров



В.В. Дякин, Г.Л. Будрина, Ю.А. Изюмов, Ф.А. Кассан-оглы, В.М. Лаптев, В.Н. Сыромятников

ботал. Он автор 15 монографий, многие из которых переведены и изданы за рубежом, большого числа обзорных работ (в том числе 20 обзоров в УФН) и более двухсот научных статей. Разбираясь в какой-то новой для себя проблеме, он стремился передать свой интерес читателю.

Юрия Александрович заражал и увлекал своих сотрудников и коллег своей, казалось, неисчерпаемой энергией. Находясь рядом с ним, было невозможно не работать. Вся лаборатория, штурмуя актуальную проблему, сидела на многочасовых семинарах, которые неоднократно переносились на следующий день. Так «разбиралась» теория симметрии, метод ренормгруппы, новые идеи в физике неупорядоченных систем... «Пройти» через этот семинар было серьезным испытанием для докладчика. Участники задавали трудные вопросы, стараясь понять любую мелочь. Всё это обеспечивало высокую научную продуктивность лаборатории Изюмова.

Ещё в 1965 г. Ю.А. Изюмов прошёл шестимесячную стажировку в Оксфордском университете у профессора Р. Пайерлса, которую называл самым важным и волнующим моментом своей научной карьеры. С тех пор он поддерживал широкие научные связи с зарубежными учёными, много путешествовал. У него были друзья во многих странах, с которыми он успешно совместно работал, о чём рассказал в своих воспоминаниях [15].

В дальнейшем лаборатория расширялась за счёт прихода целого ряда новых сотрудников, многие из которых стали известными учёными. На протяжении многих лет эта лаборатория была одной из ведущих теоретических групп на Урале. В 1988 г., после того, как в неё влилась бывшая лаборатория математических методов, она была преобразована в Отдел математической и теоретической физики. В нём в разное время работали такие известные физики-теоретики, как доктора физико-математических наук М.В. Медведев, В.Е. Найш, М.В. Садовский, Ю.Н. Скрябин, В.Н. Сыромятников, В.М. Лаптев, В.В. Дякин, Ф. А. Кассан-Оглы, М.И. Кацнельсон, В.Ю. Ирхин, Ю.Н. Горностырев, А.А. Катанин и другие известные специалисты в области теории твёрдого тела.

Лаборатория Изюмова стала своеобразной кузницей кадров для ряда других подразделений. В 1987 г. из её состава выдели-

лась лаборатория теоретической физики Института электрофизики УрО РАН; её возглавил М.В. Садовский, к которому присоединился М.В. Медведев. Ю.Н. Скрябин возглавил отдел работ на атомном реакторе и лабораторию магнитной нейтронографии. Ю.Н. Горностырев руководит Институтом квантового материаловедения.

В 1982 г. по инициативе и при непосредственном участии академика С.В. Вонсовского в составе лаборатории твёрдого тела была организована группа квантовой теории металлов, куда вошел первоначально и сам С.В. Вонсовский, а также М.И. Кацнельсон и В.Ю. Ирхин. Затем эта группа была расширена и реорганизована в лабораторию квантовой теории металлов под руководством профессора М.И. Кацнельсона; она существовала до 2004 г. в составе отдела математической и теоретической физики.

Членами данной научной группы был решён ряд фундаментальных задач теории твёрдого тела. Среди наиболее важных достижений можно отметить:

- теоретическое исследование электрон-магнетонного взаимодействия в ферромагнитных полупроводниках (совместно с М.И. Ауслендером);
- построение теории формирования аномального магнитного упорядочения в решётках Кондо и системах с тяжёлыми фермионами в рамках s-d-обменной модели [16];
- разработка теории корреляционных эффектов а полуметаллических ферромагнетиках с учётом неквазичастичных вкладов, на основе которой дано объяснение аномалий кинетических свойств этих веществ [17, 18];
- развитие метода многоэлектронных операторов Хаббарда в применении к различным задачам теории твёрдого тела [19, 20];
- исследование магнитных фазовых диаграмм и перехода металл-изолятор и в рамках многоэлектронных моделей [21, 22];



М.В. Медведев, М.В. Садовский, В.Н. Сыромятников, В.Е. Найш, Ю.А. Изюмов, О.В. Гурин, 1982



В.Г. Корешков, О.В. Гурин, Б.М. Летфулов, В.Н. Сыромятников, Ф.А. Кассан-оглы, В.М. Лаптев, В.Е. Найш, М.В. Медведев



М.С. Горбачев, М.И. Кацнельсон, В.Ю. Ирхин, 2000

- описание насыщенного и ненасыщенного ферромагнетизма в соединениях переходных металлов с сильными корреляциями [23,24];
- разработка многоэлектронной теории термодинамических и магнитных свойств полупроводников с промежуточной валентностью [25];
- решение задачи о последовательном теоретико-полевым описании термодинамики и магнитного упорядочения слоистых и цепочечных магнетиков, позволяющем проводить количественное сравнение с экспериментальными данными [26].

Кроме модельных исследований, М.И. Кацнельсон (вместе с А.В. Трефиловым из Курчатовского научного центра, А.И. Лихтенштейном, Ю.Н. Горностыревым и другими сотрудниками) интенсивно проводил первопринципные расчёты величин магнетизма и решёточных свойств металлов, развивая соответствующие методы.

В настоящее время М.И. Кацнельсон – профессор Университета Радбауда (Нидерланды, 2004 г.), лауреат премии Спинозы (2013 г.), в 2014 г. избран членом Нидерландской королевской академии наук. Вместе со своей научной группой в Голландии он продолжает исследования в области теории сильно коррелированных систем, магнетизма и особенно физики графена.

В 2011 г. лаборатория квантовой теории конденсированного состояния была воссоздана под руководством академика М.В. Садовского. Основные научные интересы его деятельности связаны с электронной

теорией неупорядоченных систем (локализация Андерсона, псевдощель, фазовые переходы металл-диэлектрик), теорией высокотемпературной сверхпроводимости [27]. Он разработал теоретико-полевого подход в теории локализации, самосогласованную теорию локализации, теорию сверхпроводников, находящихся



А.И. Лихтенштейн, М.И. Кацнельсон, В.Ю. Ирхин



М.И. Кацнельсон, В.Ю. Ирхин, М.И. Ауслендер

вблизи перехода Андерсона, построил точно решаемые модели псевдощелевого состояния, модели влияния беспорядка на пайерлсовский структурный переход. В последние годы М.В. Садовский разрабатывает обобщения DMFT в теории сильно коррелированных систем, ведёт теоретические исследования новых высокотемпературных сверхпроводников на основе железа [29]. Широко известны также его монографии по квантовой теории поля и статистической физике [30–32].

С 2014 г. М.В. Садовский является научным руководителем отдела теоретической и математической физики ИФМ УрО РАН, а возглавляет лабораторию квантовой теории конденсированного состояния д.ф.-м.н. В.Ю. Ирхин. В сфере его научных интересов квантовая теория магнетизма и различные эффекты электронных корреляций в твёрдых телах. В лаборатории продолжают исследования по многим направлениям теории конденсированного состояния. Вот некоторые из них:

- Многоэлектронное описание коллективизированного ферромагнетизма (А.О. Анохин, А.В. Зарубин).
- Модельное описание низкоразмерных и фрустрированных магнетиков, в том числе магнитокалорического эффекта (Ф.А. Кассан-Оглы, А.В. Зарубин, А.И. Прошкин, А.Н. Игнатенко).
- Модельное и первопринципное исследование магнитных свойств переходных и редкоземельных металлов, их сплавов и соединений, особенно полуметаллический ферромагнетизм. Теория магнитных фазовых переходов и переходов металл-диэлектрик в сильно коррелированных системах (П.А. Игошев, А. В. Зарубин).
- Развитие и применение к задачам теории твёрдого тела методов компьютерного моделирования классических и квантовых многочастичных систем, в том числе динамической теории среднего поля, методов Монте-Карло и численной ренормгруппы (А.О. Анохин, П.А. Игошев, А.К. Журавлев, А.Н. Игнатенко).

Отметим некоторые последние результаты, полученные при участии сотрудников лаборатории в последние годы.

Для гамма-железа (ГЦК-решётка) [33] и альфа-железа (ОЦК-решётка) [34] в рамках представлений о различной локализации t_{2g} и e_g состояний [35, 36] были рассмотрены магнитные неустойчивости в рамках динамической теории среднего поля. Путём вычисления локальной восприимчивости была исследована природа магнитных состояний в этих материалах: было показано, что для гамма-железа при низких температурах эти состояния имеют кол-



Ю.Н. Скрябин



М.В. Садовский



Сидят: В.Ю. Ирхин, П.А. Игошев, Ф.А. Кассан-оглы. Стоят: А.О. Анохин, А.В. Зарубин, А.И. Прошкин, М.В. Садовский, А.К. Журавлев, А.Н. Игнатенко

лективизированный характер, тогда как для альфа-железа узкие зоны, имеющие сингулярности ван Хова, демонстрируют проявление эффективных локальных моментов.

В работах [37–39] (некоторые результаты обобщены в монографии [40]) было исследовано формирование коллинеарного ферро- и антиферромагнитного порядка, а также спирального магнитного порядка для квадратной и различных кубических решёток в модели Хаббарда в рамках обобщённого приближения Хартри-Фока и метода вспомогательных бозонов, учитывающего корреляции. Минимизация энергии системы по параметрам магнитной структуры позволяет выбрать тип магнитного порядка, реализующегося в основном состоянии для данных параметров системы (электронная концентрация, величина внутриатомного кулоновского взаимодействия, интегралы переноса). Возникающие переходы первого рода приводят к расслоению на фазы с различным типом магнитного упорядочения.

В.Ю. Ирхин

Список литературы

1. S. Schubin, S. Wonsowsky, Proc. Roy. Soc. A **145**, 159 (1934); Zs. Sow. Phys. **7**, 292 (1935); **10**, 348 (1936).
2. С.В. Вонсовский, ЖЭТФ **16**, 981 (1946).
3. С.В. Вонсовский, *Магнетизм*, Наука, Москва (1971), 1032 с.
4. С.В. Вонсовский, Е.А. Туров, ЖЭТФ **24**, 419 (1953).
5. Ю.А. Изюмов, Р. П. Озеров, *Магнитная нейтронография*, Наука, Москва (1966), 532 с.
6. Ю.А. Изюмов, В.Н. Сыромятников, *Фазовые переходы и симметрия кристаллов*, Наука, Москва (1984), 245 с.
7. С.В. Вонсовский, Ю.А. Изюмов, Э.З. Курмаев, *Сверхпроводимость переходных металлов, их сплавов и соединений*, Наука, Москва (1977), 287 с.
8. Ю.А. Изюмов, М.В. Медведев, *Теория магнитоупорядоченных кристаллов с примесями*, Наука, Москва (1970), 271 с.
9. С.В. Вонсовский, Ю.А. Изюмов, УФН **77**, 377 (1962); **78**, 3 (1962).
10. Ю.А. Изюмов, Ф.А. Кассан-оглы, Ю.Н. Скрябин, *Полевые методы в теории ферромагнетизма*, Наука, Москва (1974), 224 с.
11. Ю.А. Изюмов, Ю.Н. Скрябин, *Статистическая механика магнитоупорядоченных систем*, Наука, Москва (1987), 254 с.
12. Ю.А. Изюмов, УФН **165**, 403 (1995).
13. Ю.А. Изюмов, Н.М. Плакида, Ю.Н. Скрябин, УФН **159**, 621 (1989).
14. Ю.А. Изюмов, В.И. Анисимов, *Электронная структура соединений с сильными корреляциями, РХД*, Ижевск (2008), 376 с.
15. Ю.А. Изюмов, *Из настоящего – в прошлое и будущее...*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2000), 296 с.
16. V.Yu. Irkhin, M.I. Katsnelson, Phys. Rev. B **56**, 8109 (1997).
17. В.Ю. Ирхин, М.И. Кацнельсон, УФН **164**, 705 (1994).
18. M.I. Katsnelson, V.Yu. Irkhin, L. Chioncel, A.I. Lichtenstein, R.A. de Groot, Rev. Mod. Phys. **80**, 315 (2008).
19. V.Yu. Irkhin, Yu.P. Irkhin, Phys. stat. sol. (b) **193**, 9 (1994).
20. В.Ю. Ирхин, Ю.П. Ирхин, *Электронная структура, физические свойства и корреляционные эффекты в d- и f-металлах и их соединениях*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2004), 472 с.; Ижевск (2008), 476 с.
21. M.I. Katsnelson, V.Yu. Irkhin, J. Phys. C: Solid State Phys. **17**, 4291 (1984).
22. V.Yu. Irkhin, A.V. Zarubin, Eur. Phys. J. **B38**, 563 (2004).
23. M.I. Auslender, V.Yu. Irkhin, M.I. Katsnelson, J. Phys. C: Solid State Phys. **21**, 5521 (1988).
24. V.Yu. Irkhin, A.V. Zarubin, Phys. Rev. B **70**, 035116 (2004).
25. В.Ю. Ирхин, М.И. Кацнельсон, ЖЭТФ **90**, 1080 (1986).
26. А.А. Катанин, В.Ю. Ирхин, УФН **177**, 639 (2007).
27. М.В. Садовский, УФН **171**, 539 (2001).
28. Э.З. Кучинский, И.А. Некрасов, М.В. Садовский, УФН **182**, 345 (2012).
29. М.В. Садовский, УФН **178**, 1243 (2008); **186**, 1035 (2016).
30. М.В. Садовский, *Лекции по статистической физике, «ИКИ»*, Москва–Ижевск (2003), 336 с.
31. М.В. Садовский, *Лекции по квантовой теории поля, «ИКИ»*, Москва–Ижевск (2003), 480 с.
32. М.В. Садовский, *Диалог*, «ИКИ», Москва–Ижевск (2004), 376 с.
33. P.A. Igoshev, A.V. Efremov, A.I. Poteryaev, A.A. Katanin, V.I. Anisimov, Phys. Rev. B **88**, 155120 (2013).

34. P.A. Igoshev, A.V. Efremov, A.A. Katanin, Phys. Rev. B **91**, 195123 (2015).
35. V.Yu. Irkhin, M.I. Katsnelson, A.V. Trefilov, J. Phys.: Condens. Matter. **5**, 8763 (1993).
36. A.A. Katanin, A.I. Poteryaev, A.V. Efremov, A.O. Shorikov, S.L. Skornyakov, M.A. Korotin, V.I. Anisimov, Phys. Rev. B **81**, 045117 (2010).
37. P.A. Igoshev, M.A. Timirgazin, A.A. Katanin, A.K. Arzhnikov, V.Yu. Irkhin, Phys. Rev. B **81**, 094407 (2010).
38. P.A. Igoshev, M.A. Timirgazin, V.F. Gilmutdinov, A.K. Arzhnikov, V.Yu. Irkhin, J. Phys.: Condens. Matter **27**, 446002 (2015).
39. M.A. Timirgazin, P.A. Igoshev, A.K. Arzhnikov, V.Yu. Irkhin, J. Phys.: Condens. Matter **28**, 505601 (2016).
40. А.А. Катанин, В.Ю. Ирхин, П.А. Игошев, *Модельные подходы к магнетизму двумерных зонных систем*, Физматлит, Москва (2013), 175 с.

ЛАБОРАТОРИЯ

теоретической физики

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- *Меньшенин Владимир Васильевич, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.*
- *Гапонцева Наталья Николаевна, ведущий инженер*
- *Горностырев Юрий Николаевич, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.*
- *Гребенников Владимир Иосифович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор*
- *Гудин Сергей Анатольевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.*
- *Дударев Михаил Степанович, старший математик, к.ф.-м.н.*
- *Дякин Вильям Вячеславович, главный специалист-советник, д.ф.-м.н., профессор*
- *Кайбичева Светлана Леонидовна, ведущий математик*
- *Карькин Илья Николаевич, научный сотрудник, к.ф.-м.н.*
- *Катанин Андрей Александрович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор РАН*
- *Коржавый Павел Алексеевич, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.*
- *Кудряшова Ольга Валерьевна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.*
- *Куркин Михаил Иванович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор*
- *Ляпилин Игорь Иванович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор*
- *Николаев Владимир Васильевич, ведущий специалист-консультант, к.ф.-м.н.*
- *Окороков Михаил Сергеевич, инженер-исследователь*
- *Проценко Владимир Сергеевич, инженер-исследователь*
- *Радзивончик Данил Игоревич, младший научный сотрудник*
- *Раевский Вениамин Яковлевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.*
- *Резер Борис Ильич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.*
- *Розенфельд Евгений Владимирович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.*
- *Шмаков Иван Георгиевич, инженер-исследователь*

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ теоретической физики

Отдел теоретической физики был создан в институте в 1946 г. Приказ о назначении руководителем отдела д.ф.-м.н. С.В. Вонсовского подписан 02.04.1946 г. За годы своего существования он был несколько раз реорганизован. В настоящий момент он называется «Отдел математической и теоретической физики», и в его состав входят три лаборатории. В этой статье остановимся, главным образом, на исследованиях, проводившихся в лаборатории теоретической физики.

В теоретическом отделе, начиная с первых лет его существования, а в последующем, в лаборатории теоретической физики, интенсивно развивались исследования, связанные с использованием теоретико-групповых методов для описания физических свойств магнитоупорядоченных кристаллов. Большой вклад в это направление исследований был сделан Е.А. Туровым. Здесь можно отметить два важных момента в развитии теории, связанные с его именем. Это касается введения понятия обменной магнитной структуры и её шифра относительно элементов кристаллохимической пространственной группы кристалла. Под обменной магнитной структурой понимают взаимную ориентацию магнитных моментов, связанную с обменным (кулоновским по происхождению) взаимодействием между магнитными моментами (на микроскопическом уровне – между соответствующими им атомными спинами). При рассмотрении этой структуры не принимаются во внимание релятивистские взаимодействия спинов с решёткой, определяющих их ориентацию относительно кристаллографических направлений. Обменные магнитные структуры включают в себя два больших класса: соизмеримые и несоизмеримые структуры. Е.А. Туровым с сотрудниками в основном исследовались магнетики, обладающие соизмеримыми коллинеарными обменными

магнитными структурами, в которых пространственные периоды изменения магнитных моментов (по величине и направлению) соизмеримы с периодом кристаллографической структуры.

Особенно продуктивным оказалось введение обменной магнитной структуры в антиферромагнетиках, в которых вектор антиферромагнетизма, задающий параметр порядка, соответствует некоторой обменной магнитной структуре и является базисной функцией одномерного неприводимого представления пространственной группы симметрии системы. В этом случае удаётся написать шифр обменной магнитной структуры, связанный с понятием чётности этой структуры относительно элементов кристаллографической группы. Обменная магнитная структура называется чётной относительно элемента симметрии пространственной группы, если он связывает между собой магнитные моменты, принадлежащие к одной и той же магнитной подрешётке, или к подрешёткам с одинаковым направлением намагниченности. В противном случае, когда элемент группы связывает моменты, относящиеся к подрешёткам с противоположными намагниченностями, обменная магнитная структура называется нечётной к нему.

Определение шифра обменной структуры сразу позволяет выяснить возможность существования в данном антиферромагнетике слабого ферромагнетизма, или магнитоэлектрического эффекта. Если обменная магнитная структура нечётна относительно пространственной инверсии, то в системе может существовать магнитоэлектрический эффект. Если же обменная магнитная структура чётна относительно этой операции, то магнитоэлектрический эффект в таком антиферромагнетике отсутствует, но возможен слабый ферромагнетизм. На динамические свойства антиферромагнетиков с обменной магнитной структурой, нечётной относительно пространственной инверсии, может влиять и электрическое поле.

Другим важным направлением физики магнитных материалов, развивавшемся в лаборатории теоретической физики, является магнитоакустика. Основополагающий вклад в это направление был внесён Е.А. Туровым и Ю.П. Ирхиным, показавшим, что имеет место резонансное взаимодействие спиновых и звуковых упругих возбуждений в магнитных материалах, когда частоты спиновых и упругих волн совпадают. В области резонанса в системе распространяются связанные магнитоакустические возбуждения: квазиспиновые и квазиупругие волны.

Экспериментальное исследование явления антиферромагнитного резонанса в гематите показало, что частота этого резонанса определяется не только величиной внешнего магнитного поля, обменным полем и полем анизотропии, включая поле Дзялошинского, но и содержит ещё один аддитивный вклад, названный «магнитоупругой щелью». Выяснению природы этого вклада в лаборатории было уделено большое внимание. В обзорной статье

Е.А. Турова и В.Г. Шаврова в УФН появление этого вклада было связано с явлением спонтанного нарушения симметрии. Дело в том, что в отсутствие релятивистских взаимодействий гамильтониан магнетика коммутирует с генераторами группы спиновых и пространственных вращений, то есть полным спиновым и орбитальным моментом, а также полным импульсом системы. Это означает, что гамильтониан инвариантен относительно спиновых и пространственных вращений в отдельности. Однако основное состояние магнетика в магнитной фазе не инвариантно относительно всех таких вращений, то есть имеет место спонтанное нарушение симметрии. Это приводит к появлению бесцелевых спиновых волн с квадратичным законом дисперсии, которые восстанавливают нарушенную симметрию. Если принять во внимание релятивистские взаимодействия, в том числе взаимодействие спинов с решёткой, то теперь гамильтониан коммутирует только с полным угловым моментом и полным импульсом системы, тогда как с полным спиновым моментом гамильтониан теперь не коммутирует. Последнее обстоятельство приводит к тому, что в спектре спиновых возбуждений возникнут энергетические щели, которые должны проявляться и для длинноволновых возбуждений с равным нулю волновым вектором. Поскольку эти энергетические щели связаны с релятивистскими взаимодействиями, в частности, релятивистским магнитоупругим взаимодействием, то последнее должно создавать эффективное поле магнитной анизотропии. Это эффективное поле магнитной анизотропии содержит два вклада (Е.А. Туров, В.Г. Шавров). В первом из них учитывается равновесная связь между магнитными моментами и деформациями, что приводит лишь к перенормировке констант магнитной анизотропии и не нарушает их симметрию относительно кристаллографической группы парамагнитного состояния. Второй вклад связан со спонтанными деформациями в основном состоянии антиферромагнетика. Эти деформации не следуют за движением магнитных моментов. Именно этот вклад и приводит к возникновению магнитоупругой щели.

Отметим теперь, что оператор полного импульса системы является генератором непрерывной группы трансляций системы. В кристаллическом состоянии эта симметрия понижается до трансляций на векторы прямой решётки. Можно показать (Н.Н. Боголюбов (мл.), Б.И. Садовников), что в этом случае длинноволновые флуктуации плотности ведут к появлению длинноволновых возбуждений с линейным законом дисперсии, частота которых обращается в нуль при стремлении волнового вектора к нулю, что соответствует акустическим упругим волнам. Благодаря наличию взаимодействия этих волн с магнитной подсистемой, должны возникнуть эффекты, обусловленные этой связью. Выше мы уже упоминали о том, что релятивистские взаимодействия приводят к тому, что спиновые волны не являются в этом случае модами,

восстанавливающими симметрию. Таким образом, при фазовом переходе второго рода из парамагнитного в магнитоупорядоченное состояние квазиспиновая волна не является мягкой модой, по которой он происходит. Такой модой оказывается квазиакустическая волна. Учтём теперь теорему Боголюбова (Н.Н. Боголюбов) об особенности статической поперечной магнитной восприимчивости. В этом случае закон дисперсии мягкой моды должен быть при малых волновых векторах, по крайней мере, квадратичным. Таким образом, при малых волновых векторах квазиакустическая мода должна изменить закон дисперсии с линейного на квадратичный. Обратим внимание на то обстоятельство, что наиболее полно наличие магнитоупругой связи проявляется в области ориентационных фазовых переходов, где часть магнитной анизотропии, не содержащая магнитоупругую щель, обращается в нуль. В области таких переходов экспериментально было найдено уменьшение скорости квазиакустической волны, которое было связано с изменением её закона дисперсии.

Остановимся теперь на некоторых динамических свойствах антиферромагнетиков, в которых может иметь место магнитоэлектрический эффект и проявляется влияние внешнего электрического поля на магнитную динамику. Эти эффекты возможны в тех антиферромагнитных структурах, кристаллическая симметрия которых содержит пространственную инверсию, причем эта операция приводит к нетождественной перестановке магнитных атомов в одной и той же кристаллографической позиции, а в магнитоупорядоченном состоянии является нечётным элементом обменной магнитной структуры, так называемых центроантисимметричных антиферромагнетиков. В этом случае (Е.А. Туров, В.В. Николаев) в антиферромагнетике может реализоваться необычный тип спиновых возбуждений, в которых колеблется только вектор антиферромагнетизма, в то время как вектор ферромагнетизма остаётся в покое. Такие возбуждения должны генерироваться переменным электрическим полем, а переменное магнитное поле не приводит к их возбуждению. Появление таких необычных волн связано с магнитоэлектрическим и антиферроэлектрическим взаимодействием. Первое из этих взаимодействий в феноменологическом подходе пропорционально произведению компонент магнитного момента, вектора антиферромагнетизма и электрического поля, каждая из которых входит в выражение в первой степени, инвариантное относительно преобразований группы кристаллической симметрии. Второе пропорционально произведению билинейной комбинации компонент вектора антиферромагнетизма и компоненты вектора электрического поля. При этом изменение знака компоненты вектора электрического поля под действием пространственной инверсии должно компенсироваться изменением знака компоненты вектора антиферромагнетизма в магнитоэлектрическом взаимодействии и одной из компонент этого вектора

в антиферроэлектрическом взаимодействии. Благодаря этим взаимодействиям, имеет место возникновение связанных колебаний электроактивных спиновых возбуждений и электромагнитных волн – магнон-фотонный резонанс. Был предложен также магнитоупругий механизм магнитоэлектрического взаимодействия в антиферромагнетиках (М.И. Куркин, В.В. Меньшенин, В.В. Николаев, Е.А. Туров, Н.Б. Орлова).

В магнитоупорядоченных кристаллах, как известно (Е.А. Туров, М.П. Петров), в сверхтонкое поле на ядре вносят вклад колебания векторов антиферромагнетизма и ферромагнетизма. В случае рассматриваемых систем их колебания вызваны переменным электрическим полем. Здесь частота ядерного магнитного резонанса будет зависеть от электрического поля, то есть колебания ядерных спинов можно вызвать переменным электрическим полем (В.В. Лесковец, Е.А. Туров).

Транспортные свойства центроантисимметричных антиферромагнетиков обладают одним интересным эффектом, который предсказан теоретически, но пока экспериментально не обнаружен. Он был назван авторами антиферромагнитным фотогальваническим эффектом (В.В. Меньшенин, Е.А. Туров). Этот эффект представляет собой генерацию постоянного электрического тока в системе монохроматическим светом. Раньше этот эффект наблюдался только в немагнитных кристаллах без центра симметрии. Отсутствие центра симметрии оказывается важным моментом, поскольку в этом случае не выполняется принцип детального равновесия для прямых и обратных переходов электронов. Это приводит к изменению кинетических свойств кристаллов, например, к тому, что направление электрического фототока определяется только симметрией кристалла. В центроантисимметричных антиферромагнетиках в магнитном состоянии центр симметрии становится центром антисимметрии. Поэтому выражение для фототока можно записать в феноменологическом подходе, пропорциональным вектору антиферромагнетизма, что обеспечивает инвариантность выражения для фототока относительно преобразований пространственной группы симметрии кристалла.

В антиферромагнетиках также имеются некоторые особенности акустического двулучепреломления (Е.А. Туров, И.Ф. Мирсаев, В.В. Николаев). В основе симметричной классификации этих особенностей лежит инвариантное разложение магнитного вклада в тензор упругих модулей по векторам ферро- и антиферромагнетизма, магнитной индукции, а в случае центроантисимметричных антиферромагнетиков и вектору электрического поля, а также волновому вектору. При этом магнитный вклад в этот тензор оказывается аддитивной добавкой к немагнитной части тензора упругих модулей. Используя соотношения Онсагера, можно выделить симметричную и антисимметричную часть магнитного вклада в упругие модули относительно перестановки индексов и измене-

ния знака параметров разложения. Для акустически прозрачных сред (то есть пренебрегая затуханием волн) магнитная часть модулей упругости должна быть эрмитовой. Отсюда следует, что реальная часть этого вклада симметрична по перестановке индексов, а мнимая – антисимметрична. Симметричная часть магнитного вклада в упругие модули порождает линейное акустическое двулучепреломление, заключающееся в различии фазовых скоростей двух собственных упругих мод с данным волновым вектором и различными поляризациями. Несимметричная часть этих модулей приводит к гироскопии и порождает акустическую активность и связанное с ней круговое двулучепреломление упругих волн.

Спонтанный антиферромагнитный эффект кругового двулучепреломления может наблюдаться в антиферромагнетиках с центросимметричной обменной магнитной структурой. В низшем приближении по параметрам разложения этот эффект линейен по вектору антиферромагнетизма. Во всех таких системах обменная магнитная структура и ориентационное состояние допускают существование слабого ферромагнетизма Дзялошинского-Мория. Акустическая активность, квадратичная по магнитному полю, может наблюдаться в тетрагональном «легкоосном» антиферромагнетике FeCo_2 , когда вектор индукции магнитного поля перпендикулярен лёгкой оси, а волновой вектор параллелен этой оси. В этом случае круговое двулучепреломление должно наблюдаться в чистом виде.

Линейное двулучепреломление антиферромагнитной природы, обусловленное вкладами в симметричную часть магнитной добавки к упругим модулям, квадратичными по вектору антиферромагнетизма или билинейными по вектору антиферромагнетизма и индукции магнитного поля, может наблюдаться в тетрагональных антиферромагнетиках типа «лёгкая ось», если вектор индукции магнитного поля и волновой вектор параллельны лёгкой оси.

В антиферромагнетиках с центроантисимметричной обменной магнитной структурой линейное двулучепреломление антиферромагнитной природы определяется вкладом в симметричную часть магнитной добавки модулей упругости билинейным по вектору антиферромагнетизма и волновому вектору, а круговое двулучепреломление – билинейным по вектору антиферромагнетизма и электрическому полю вкладом в антисимметричную часть модулей упругости. Укажем теперь на следующее обстоятельство. Если в антиферромагнетике имеет место магнитоэлектрический эффект, то в симметричной части магнитной добавки необходимо учитывать вклад, линейный по электрическому полю, вектору антиферромагнетизма и вектору магнитной индукции, учитывающий магнитоэлектрическое взаимодействие. В этом случае в некоторых тетрагональных антиферромагнетиках линейное двулучепреломление целиком обусловлено этим магнитоэлектрическим взаимодействием (Е.А. Туров, В.В. Меньшенин, В.В. Николаев).

Упругий ангармонизм в магнитоэлектрических тетрагональных антиферромагнетиках, обусловленный магнитоупругим и магнитоэлектрическим взаимодействием, сопровождается появлением новых эффективных модулей упругости, отличных от нуля только в том случае, если к образцу одновременно приложено как магнитное, так и электрическое поле. Этот ангармонизм может быть гигантским в области ориентационных фазовых переходов, превышая нелинейные модули упругости на три, четыре порядка по величине (В.В. Меньшенин, Е.А. Туров). При этом вблизи этих переходов система оказывается неустойчивой относительно распада продольной квазимонохроматической квазиупругой волны на две поперечные квазимонохроматические волны.

Явление ядерного магнитного резонанса в магнитоупорядоченных кристаллах имеет существенные особенности по сравнению с немагнитными кристаллами. Связаны они, прежде всего, с очень большим по величине локальным магнитным полем на ядрах, создаваемым электронами. Как известно (А. Абрагам), локальное магнитное поле, порождаемое электроном на ядре, содержит три вклада. Первый из них связан с орбитальным движением электрона, второй обусловлен дипольным вкладом от собственного магнитного момента электрона, а третий, называемый контактным полем Ферми, связан с вкладом s-электрона. Последний вклад в локальное поле от всех электронов пропорционален спиновой плотности s-электронов, появляющейся только в том случае, если электроны с разной ориентацией спина имеют разную плотность вероятности на ядре. В 3d-металлах контактное взаимодействие Ферми за счёт взаимодействия электронов внутренних и внешних s-оболочек с d-электронами оказывается главным вкладом в локальное поле, поскольку орбитальный момент d-электронов заморожен. По величине локальное поле оказывается порядка 10^7 – 10^8 А/м. В редкоземельных элементах основной вклад в локальное поле связан с орбитальным моментом электронов, а локальное поле оказывается на порядок больше, чем в 3d-системах. В связи с этим в магнитоупорядоченных кристаллах имеют место эффекты усиления радиочастотного поля на ядрах и сигнала ЯМР. Физически эти эффекты связаны с вкладом от переходов электронов на частоте ЯМР. Они характеризуются коэффициентами усиления, пропорциональными локальной магнитной восприимчивости, которые в изотропном случае равны между собой. По порядку величины они составляют 10^3 – 10^4 (М.П. Петров, Е.А. Туров).

В лаборатории теоретической физики большое внимание уделялось исследованию ЯМР в многодоменных образцах. Сигнал ЯМР в таких образцах может быть на несколько порядков больше, чем в однодоменном материале. Дело в том, что при смещении границы в результате приложенного радиочастотного поля осуществляется поворот намагниченности. Однако угол поворота

в доменной стенке пропорционален восприимчивости смещения, а не восприимчивости вращения, как в однодоменном образце. Обычно восприимчивость смещения значительно больше, чем восприимчивость вращения. В результате оказывается больше и коэффициент усиления сигнала в доменной стенке, чем в доменах (М.П. Петров, Е.А. Туров). Вследствие неоднородности намагниченности внутри доменных границ в форме линии сигнала ЯМР появляются пики (Е.А. Туров, А.П. Танкеев, М.И. Куркин, С.В. Иванов) как внутри границы, так и внутри домена.

Было проведено теоретическое описание времен ядерной магнитной релаксации. Ядерная магнитная релаксация в ферромагнетиках связана главным образом с колебаниями намагниченности, что в микроскопическом подходе эквивалентно появлению в системе магнонов. Известно (I.M. Winter), что в многодоменном образце могут существовать, по меньшей мере, две ветви магнонов. Первая ветвь магнонов существует как в доменах, так и доменных границах. Это обычная спиновая волна. Амплитуда колебаний второй ветви максимальна в центре доменной границы и экспоненциально убывает к её краям, то есть она описывает изменение намагниченности внутри доменной границы. В результате оказывается, что времена ядерной магнитной релаксации зависят от расположения ядерного спина. При низкой концентрации магнитных ядер их взаимодействием можно пренебречь. В этом случае скорость продольной и поперечной релаксации представляется в виде ряда по чётным степеням амплитуд магнонов. Тогда, в частности, для случая блоховской доменной границы время продольной релаксации включает в себя вклад от скорости релаксации, вызванной тепловыми «внутридоменными» магнонами и вклад от процессов поглощения или испускания «внутриграницного» магнона. Скорость же поперечной релаксации содержит помимо вклада от тепловых магнонов вклад от двухмагнонных процессов рассеяния «внутриграницных» магнонов. Полученная координатная зависимость времён релаксации хорошо описывает форму линии магнитного резонанса. Температурная зависимость линии описывается в этом приближении значительно хуже (Е.А. Туров, М.И. Куркин, А.П. Танкеев, С.В. Иванов).

Исследованию динамических свойств ферромагнетиков, обладающих доменной структурой, в теоретическом отделе, а затем лаборатории теоретической физики уделялось пристальное внимание. Е.А. Туровым впервые был использован метод вторичного квантования для расчёта спиновых волн в однодоменном образце. В приближении Винтера им с соавторами были рассчитаны спиновые возбуждения в ферромагнетике с периодической магнитной структурой. Было показано, что возможны два типа возбуждений в такой системе, а именно: внутридоменные спиновые волны и возбуждения внутри доменных границ, называемые трансляционными модами. В пренебрежении магнитоупругими взаимодействиями

внутриграницные возбуждения являются бесщелевыми. Общий анализ спектров спинволновых возбуждений с учётом влияния дипольной энергии в ферромагнетике с доменными границами был изучен М.И. Куркиным и А.П. Танкеевым. Они показали, что в этом случае существуют три типа возбуждений. К указанным выше типам добавляются ещё спиновые колебания пристеночного типа.

В.В. Николаевым и А.Б. Диченко, А.П. Танкеевым, В.В. Дякиным, М.С. Дударевым проводились исследования возникновения магнитных доменов в упругом поле дислокаций. Физическая причина такого зарождения связана с тем, что неоднородные упругие напряжения полей дислокаций создают эффективную магнитную анизотропию благодаря магнитоупругому взаимодействию. Эта эффективная магнитная анизотропия вблизи дислокаций может превышать магнитокристаллическую анизотропию бездефектного тела. В результате воздействия эффективной магнитной анизотропии, создаваемой упругими полями дислокаций, распределение намагниченности вблизи дислокаций становится неоднородным, что способствует возникновению зародышей доменной структуры.

Магнитоакустический резонанс доменных границ исследовался в работах Е.А. Турова, А.А. Лугового, В.В. Дякина. Физика этого явления основана на том, что неоднородное распределение намагниченности внутри доменной границы создаёт как внутри, так и вокруг неё неоднородные упругие деформации. Тогда трансляционные колебания доменной границы с учётом создаваемых ею деформаций приводит к существованию двух резонансов. Первый резонанс обусловлен голдстоуновской модой системы, связанной с вырождением основного состояния системы относительно смещения доменной границы с созданными ею неоднородными деформациями, когда граница не закреплена внешними причинами в определённом месте. При наличии таких внешних причин этот резонанс наблюдается на частоте отличной от нуля. Второй резонанс обусловлен квазилокальной модой, представляющей собой колебания доменной границы относительно созданных ею неоднородных деформаций. Квазилокальная мода возникает лишь при достижении некоторых пороговых значений параметров системы.

В последние годы в лаборатории теоретической физики большое внимание уделялось изучению мультиферроиков, в которых в некотором температурном интервале сосуществуют магнитный и сегнетоэлектрический дальний порядок. Исследовались главным образом манганаты, в которых имеет место сильная связь между магнитной подсистемой и сегнетоэлектрическим упорядочением, поскольку электрическая поляризация возникает только после появления дальнего магнитного порядка. Было теоретически показано (В.В. Меньшенин), что только в случае перехода из парамагнитного состояния в длиннопериодическую магнитную структуру, несоизмеримую по одному пространственному направлению,

электрическая поляризация возникает как сопутствующий макроскопический параметр порядка. Далее в системе с понижением температуры формируется магнитная солитонная решётка. Потеря устойчивости этой решётки сопровождается переходом первого рода в соизмеримую антиферромагнитную фазу, в которой электрическая поляризация достигает своего максимального значения. Дальнейшее понижение температуры приводит, как найдено экспериментально, из соизмеримой магнитной фазы в несоизмеримую по двум направлениям магнитную структуру. В предположении, что этот переход является переходом второго рода найдено (В.В. Меньшенин, В.В. Николаев, А.В. Дмитриев), что вдоль одной из осей кристалла распределение магнитного параметра порядка является периодическим, тогда как вдоль оси ей перпендикулярной оно носит характер кинка, обладающего свойством трансляционной инвариантности вдоль этой оси. Поляризация в этом случае существенно уменьшается по величине и становится неоднородной по образцу. Заметим, что возможность существования в магнитных фазах электрической поляризации связана с тем, что в этих фазах центр инверсии, как элемент точной симметрии системы, исчезает.

Существование неколлинеарного магнитного основного состояния, представляющего собой несоизмеримое с периодами кристаллической решётки неоднородное распределение намагниченности, довольно частое явление в магнитных системах. Такое состояние возникает, например, в системах без центра инверсии, где ответственным за такое упорядочение оказывается взаимодействие Дзюшинского-Мория. Оно может реализоваться и за счёт обменных взаимодействий. В лаборатории теоретической физики исследовано возникновение и развитие апериодических искажений магнитной спирали с ростом кристаллографической магнитной анизотропии в плоскости вращения намагниченности. Установлена физическая причина возникновения особенностей на фазовой диаграмме, прослежена связь с моделью ANNNI. Показано, что при достаточно высокой анизотропии и определенных величинах межслойных обменных интегралов энергии спиралей с разными периодами становятся одинаковыми – в магнитной спирали возникает возможность развития доменной структуры. Меняя разность энергий фаз при помощи упругих напряжений или электрического поля, в принципе можно создать на основе этой структуры управляемую магнитную дифракционную решётку (Е.В. Розенфельд)

До сих пор рассматривались главным образом свойства магнитных диэлектриков. Остановимся теперь на исследованиях, выполненных в лаборатории теоретической физики, связанных с проводящими магнитными системами.

Отметим сначала, что работы С.В. Вонсовского по этой проблематике обсуждаются в статье В.Ю. Ирхина. Здесь же мы остано-

вимся на фундаментальной работе С.В. Вонсовского и Е.А. Турова, посвящённой обоснованию s-d-обменной модели переходных металлов. В рамках многоэлектронного подхода для локализованных электронов внутренних оболочек в представлении атомных орбиталей и блоховских функций для электронов проводимости было получено выражение для гамильтониана системы в представлении вторичного квантования. Для анализа этого гамильтониана были сделаны два существенных упрощающих предположения: не принималось во внимание взаимодействие между собой электронов проводимости, а также предполагалось, что у каждого узла решётки может находиться по одному d- электрону (условие гомеополарности). С учётом этих упрощающих предположений энергия системы представляет собой сумму трёх вкладов. Первый из них есть сумма энергий всех электронов проводимости, подмагниченных обменным взаимодействием с полностью магнитно упорядоченными d-электронами. Второй вклад определяет энергию ферромагнетона и учитывает отклонение от насыщения. Наконец, третий вклад принимает во внимание взаимодействие между электронами проводимости и ферромагнетонами. Таким образом, в работе было показано, что s-d-обменное взаимодействие позволяет последовательно проводить рассмотрение статических и динамических свойств ферромагнетиков, в которых важна связь между электронными и магнитными свойствами проводящих ферромагнетиков.

В середине прошлого века была осознана важная роль спиновых флуктуаций в магнетизме переходных d- металлов. Наиболее простой моделью для учёта влияния этих флуктуаций на формирование дальнего магнитного порядка оказалась модель Хаббарда узкозонного металла, принимающая во внимание обменное и зарядовое взаимодействие электронов. Константы этих взаимодействий принимаются локализованными внутри атома. Спиновые флуктуации для такого локализованного подхода вводятся путём снятия ограничения на отличие обменного поля на узле от его значения в приближении среднего поля. При этом предполагается, что зарядовое поле на узле определяется в приближении Хартри-Фока, а зарядовые флуктуации равновесным образом подстраиваются под распределение обменных полей. В этом случае каждая конфигурация обменных полей на узлах задаётся своим весом. Обычно в этой модели рассматривается одноузельная весовая функция. Её расчёт основан на учёте только когерентного рассеяния электронов на окружающих узлах. Тогда соответствующий когерентный потенциал рассеяния зависит от энергии и спина электрона и определяется из условия равенства нулю средней одноузельной матрицы рассеяния.

В лаборатории в кратко описанном выше подходе локализованных спиновых флуктуаций изучались температурные флуктуации спиновой электронной плотности, восприимчивость парамагнитных переходных металлов, температурная зависимость

электросопротивления и аномального эффекта Холла (В.И. Гребенников, Ю.И. Прокопьев), а также флуктуационная теория была применена к двухподрешёточным антиферромагнетикам (В.И. Гребенников, Ю.И. Прокопьев, О.Б. Соколов, Е.А. Туров). Дальнейшие исследования в этом направлении привели к обобщению локальной теории. Была построена расширенная динамическая спин-флуктуационная теория магнитных металлов (Н.Б. Мельников, Б.И. Резер, В.И. Гребенников). В этой теории принимаются во внимание нелокальность температурных спиновых флуктуаций и их межмодовое взаимодействие. Проведена самосогласованная ренормализация среднего поля и спиновой восприимчивости, благодаря учёту более высоких порядков разложения свободной энергии в ряд по флуктуациям обменных полей. Этот подход исключил фиктивный переход первого рода из парамагнитного в ферромагнитное состояние, который обычно получается в гауссовом приближении. Возникает правильный переход второго рода. По заданной плотности электронных состояний и константе внутриатомного электронного взаимодействия рассчитываются температура Кюри, намагниченность, восприимчивости, величина локальных моментов, её флуктуации и другие термодинамические величины при любой температуре. Особенности теории были продемонстрированы на примере расчёта инварного сплава.

Выведены формулы для сечения магнитного рассеяния для систем с коллективизированными электронами в рамках динамической теории спиновых флуктуаций (Б.И. Резер, Н.Б. Мельников). Было использовано адиабатическое приближение, в котором атомы считались неподвижными. Оказалось, что для неполяризованного пучка нейтронов дважды дифференциальное сечение рассеяния выражается через фурье-образ двухвременного коррелятора спиновой плотности в четырёхмерном пространстве (импульс, частота). Для поляризованных нейтронов дважды дифференциальное сечение рассеяния связано с двухвременными корреляторами компонент спиновой плотности, перпендикулярных вектору рассеяния нейтронов.

Рассчитаны магнитные характеристики ОЦК-железа в парамагнитном состоянии и проведено сравнение численных результатов с экспериментом по поляризованному рассеянию нейтронов. Показано, что ближний порядок в ОЦК-железе сохраняется при температурах значительно выше температуры Кюри, но лишь на небольших расстояниях (не более 5 \AA).

Проведены исследования магнитных свойств материалов на основе двойных соединений R_2Fe_{17} ($R=Y, Sm; M=Fe, Co$). Рассмотрено также влияние допирования этих соединений N, Al, Si на их магнитные свойства. В рамках динамической теории флуктуаций спиновой плотности вычислены температуры Кюри этих соединений из условия обращения в нуль средней намагниченности системы. Значение температуры Кюри оказалось равным отно-

шению энергии обменного расщепления к среднеквадратичному параметру флуктуаций случайного обменного поля. Энергия обменного расщепления пропорциональна намагниченности системы при нулевой температуре, а параметр среднеквадратичных флуктуаций пропорционален локальной магнитной восприимчивости. Примеси оказывают более существенное влияние на магнитные свойства соединений на основе железа (В.И. Гребенников, С.А. Гудин).

На основе теории спиновых флуктуаций в модели неупорядоченного сплава с двумя константами внутриатомного обменного взаимодействия на атомах переходного металла исследованы магнитные свойства сплава $Fe_{1-x}Al_x$ (В.И. Гребенников, Д.И. Радзивончик). Существенные моменты использованной теории состояли в следующем. Была изучена не однозонная модель, а приняты во внимание все пять состояний d-электронов. Рассматривалось гейзенберговское представление для обменного флуктуирующего поля во всем образце. Проводилось разделение высокочастотных и низкочастотных спиновых флуктуаций в уравнении для когерентного потенциала, используемого в теории. Принципиальное отличие сплава с двумя константами внутриатомного обмена от соединений, в которых имеется лишь одна такая константа, заключается в появлении нескольких типов метастабильных состояний вместо одного. При этом при низких температурах эти метастабильные состояния проявляются сильнее.

Переходы между этими состояниями могут приводить к немонотонной зависимости от температуры магнитных свойств. В сплаве $Fe_{1-x}Al_x$ найдены 4 типа метастабильных магнитных состояний (различающихся по величине и направлению магнитных моментов атомов). Переходы между этими состояниями порождают разнообразие температурных зависимостей его магнитных свойств.

Физические процессы, определяющие ширину линии ферромагнитного резонанса в металлах оказались трудными для описания. Довольно хорошо описано уширение линии, связанное со скин-эффектом. Наличие скин-эффекта приводит к возбуждению сверхвысокочастотным полем спиновых волн со средней длиной волны порядка скин-слоя, а не к однородной прецессии спинов. Однако экспериментальные данные позволяют утверждать, что, во всяком случае, для сплавов важную роль играет релаксационное уширение, обязанное своим происхождением затуханию поперечных компонент намагниченности, возбуждаемых при ферромагнитном резонансе (ФМР). Был предложен следующий подход для описания этого механизма уширения линии ФМР (А.Н. Волошинский, Н.В. Рыжанова, Е.А. Туров). Причиной релаксации являются процессы поглощения и испускания квантов квазиоднородной прецессии намагниченности электронами проводимости. При этом в примесных металлах основную роль играют некогерентные процессы без сохранения квазиимпульса. Они могут быть

обусловлены сильным s - d (или s - f) обменным взаимодействием, которое для некогерентных процессов оказывается эффективным. Указанный механизм релаксации может работать, если имеется быстрая релаксация спинов электронов проводимости. Вычисленный результат для ширины линии по магнитному полю хорошо согласуется с экспериментальными данными.

В лаборатории теоретической физики широко используются методы квантовой теории поля для исследования физических свойств материалов, включая низкоразмерные системы. Так, для исследования магнитных фазовых переходов используется ренормгрупповой подход. Суть стандартной процедуры этого подхода состоит в следующем. Макроскопической функции распределения вероятности параметра порядка ставят в соответствие вектор параметрического многообразия, компонентами которого являются константы взаимодействия эффективного гамильтониана системы. Тогда любое преобразование, переводящее исходную функцию распределения вероятности параметра порядка в другую функцию, можно представить как преобразование указанного выше вектора под действием элементов ренормализационной группы. Это преобразование происходит в два этапа. На первом этапе параметр порядка записывается в виде суммы фурье-мод с волновыми векторами, большими и меньшими по модулю, чем определённый масштаб, называемый параметром обрезания. Далее проводится усреднение по короткодействующим флуктуациям параметра порядка. На втором этапе итерационной ренормгрупповой процедуры изменяется масштаб координат и волновых векторов мод так, чтобы выражение для перемасштабированного эффективного гамильтониана имело ту же самую форму, что и исходный гамильтониан. Комбинированный эффект обрезания мод и изменения масштабов должен тогда привлечь внимание модификацию констант связи, как раз и задающую ренормгрупповое преобразование. Первый этап этой процедуры не удается выполнить точно. Модификация этого подхода была реализована в разработке метода функциональной ренормгруппы. В этой модификации первый шаг ренормгруппового преобразования выполняется точно. Достичь этого удается путём получения точного ренормгруппового уравнения. Это уравнение возникает при дифференцировании по масштабу обрезки функционального интеграла для эффективного действия. Это действие является производящим функционалом связанных функций Грина без внешних линий. Последнее обстоятельство позволяет получить решение ренормгруппового уравнения. Этот подход хорошо адаптирован к исследованию сильно коррелированных электронных систем.

Был проведён ренормгрупповой анализ магнитных переходов в манганатах (В.В. Меньшенин). Этот анализ показал, что переход в соизмеримую по одному направлению магнитную структуру является переходом второго рода. С помощью этого анализа

удалось также установить, что в некоторых из соединений рассматриваемого класса электрическая поляризация не возникает благодаря тому, что магнитные флуктуации в области такого перехода повышают симметрию эффективного гамильтониана, что приводит к исчезновению инвариантов в этом гамильтониане, содержащих электрическую поляризацию.

Предложен вариант метода функциональной ренормгруппы, который, благодаря плавному выключению магнитного поля во время ренормгруппового потока, способен описать состояние сингулярной ферми-жидкости (СФЖ), которое возникает из-за присутствия локальных магнитных моментов в квантовых точках. Предложенная схема позволяет описывать квантовый переход из «сингулярной» в «регулярную» парамагнитную фазу, возникающий при приложении напряжения на затворе. Разработанный метод применен к описанию системы параллельных квантовых точек. При этом найдено значительное расщепление электронных энергетических уровней в фазе СФЖ в пределе исчезающего магнитного поля; проводимость хорошо согласуется с результатами численной ренормгруппы. Используя предложенный подход к системе параллельных квантовых точек асимметрично связанных с контактами, продемонстрировано наличие в них также состояния с СФЖ, приводящего к резонансам Фано в проводимости вблизи квантового фазового перехода в нормальное состояние (А.А. Катанин, В.С. Проценко). Представлены формулировки потока функциональной ренормгруппы для сильно коррелированных электронных систем, в которой начальное выражение для функций Грина определяется динамической теорией среднего поля. Рассматривались два варианта определения потока. Первый вариант основан на одночастично неприводимом подходе относительно локальных функций Грина, тогда как во втором варианте используется метод дуальных фермионов. Показано, что оба метода допускают ренормализацию. При этом метод дуальных фермионов применим, если одночастично неприводимые вершины относительно локальных функций Грина шестого и более высокого порядка малы (А.А. Катанин).

В лаборатории теоретической физики большое внимание уделялось развитию методов описания транспортных свойств неравновесных систем. Одним из эффективных методов описания транспортных свойств в указанных системах является метод неравновесного статистического оператора. В развитии этого метода большое участие принимал В.П. Калашников. Основные идеи этого метода основаны на двух положениях. Первое из них представляет собой принцип ослабления корреляций Н.Н. Боголюбова, состоящий в том, что при эволюции системы в течение продолжительного времени, значительно большего времени размешивания, можно не рассматривать корреляции в системе, которые распадаются за время размешивания. Вторая идея состоит

в предположении, что при описании эволюции системы с помощью средних значений некоторых операторов, эти средние по неравновесному статистическому оператору совпадают со средними значениями этих же операторов по вводимому в теорию квазиравновесному статистическому оператору. Сам квазиравновесный статистический оператор является некоторым функционалом от указанных выше средних значений операторов, взятых в один и тот же момент времени. При этом предполагают, что в некоторый начальный момент времени неравновесный и квазиравновесный статистические операторы совпадают.

Неравновесные свойства магнитных полупроводников методом неравновесного статистического оператора исследовались в работах В.П. Калашникова, М. Ауслендера, Н.Г. Бебенина. Транспортные свойства двумерного электронного газа с учётом спин-орбитального взаимодействия рассматривались в работах И.И. Ляпилина и А.Е. Патракова. В последнее время большое внимание в мире уделяется исследованию спинового тока, то есть возможности переноса спина без переноса заряда. Это явление изучается в настоящее время И.И. Ляпилиным и М.С. Окороковым. В частности, последними авторами методом неравновесного статистического оператора исследован спиновый транспорт поперёк интерфейса в гибридной структуре полупроводник/ферромагнитный диэлектрик в условиях спинового эффекта Зеебека. Рассмотрено влияние резонансного (электродипольного) возбуждения спиновой подсистемы электронов проводимости на возбуждение спин-волнового тока в диэлектрике. Показано, что в рассматриваемых условиях возбуждение спин-волнового тока также имеет резонансный характер.

В 80–90-х гг. прошлого века был открыт эффект гигантского магнитосопротивления в магнитных металлических сверхрешётках, заключающийся в зависимости электросопротивления от приложенного к ней внешнего магнитного поля. Физика этого явления основана на зависимости рассеяния электрона на магнитном атоме от взаимной ориентации спина электрона и магнитного момента на атоме. В сверхрешётках электроны рассеиваются на атомах магнитной подрешётки, если спин электрона и магнитный момент атома сонаправлены друг с другом, тогда как при антипараллельных спине электрона и магнитном моменте атома рассеяние практически не происходит. В этом случае рассеяние сверхрешётки в ферромагнитном состоянии оказывается меньше, чем в антиферромагнитном, поскольку в последнем рассеяние испытывают все электроны. Зависимость электросопротивления от магнитного поля связана с изменением магнитного состояния сверхрешётки от антиферромагнитного к ферромагнитному.

Открытие эффекта гигантского магнитосопротивления в магнитных сверхрешётках привлекло к их изучению многих исследователей. В лаборатории теоретической физики проведены теоретические работы по описанию магнитных свойств сверхрешёток

Fe/Cr/Fe (М.И. Куркин, С.А. Гудин, Н.Б. Орлова). Для этих сверхрешёток найден интервал значений толщины прослойки хрома, в котором сосуществуют ферромагнитное и антиферромагнитное состояния без магнитного поля. Предсказана возможность намагничивания Fe/Cr/Fe при таких значениях толщины прослойки хрома магнитным полем фазовым переходом первого рода. Такой переход должен проявляться в том, что кривая намагничивания плёнки из антиферромагнитного состояния должна выйти за пределы петли гистерезиса перемагничивания плёнки в ферромагнитном состоянии. Этот эффект обнаружен экспериментально.

В эти же годы был открыт эффект колоссального магнитосопротивления в ферромагнитных и антиферромагнитных оксидах металлов, имеющих структуру перовскита (манганиты). Отметим, что в этих системах причины его существования до конца не понятны до сих пор. В лаборатории предложен метод разделения наблюдаемого в манганитах магнитосопротивления (МС) на составляющие, соответствующие трём механизмам: «размерному», «ориентационному» и «магнитному». Первые два механизма связаны с расслоением вещества на ферромагнитную и неферромагнитную фазы, которые значительно различаются по величине электросопротивления. Размерный механизм МС обусловлен влиянием магнитного поля на размеры ферромагнитных включений. Ориентационный механизм МС определяется зависимостью электросопротивления от взаимной ориентации намагниченностей ферромагнитных включений. Магнитный механизм МС определяется свойствами намагниченности ферромагнетика, в частности, особенностью Кюри-Вейсса на температурной зависимости магнитной восприимчивости в точке Кюри. Этот механизм существует в однородных веществах, хотя его величина может зависеть от магнитных свойств неоднородностей. Метод разработан для веществ с активационным типом проводимости. Исследована возможность применения предложенного метода для анализа МС вблизи перехода диэлектрик-металл (С.А. Гудин, М.И. Куркин, Э.А. Нейфельд, А.В. Королев, Н.Н. Гапонцева, Н.А. Угрюмова).

Сравнительно недавно было открыто явление перемагничивания проводящего ферромагнетика лазерными импульсами фемтосекундной длительности. Основная особенность физики этого явления состоит в том, что время переориентации магнитного момента в рамках существующих моделей динамики спинов на три-четыре порядка больше, чем длительность лазерного импульса. Для теоретического описания этого явления было предложено использовать модель двухуровневой системы (М.И. Куркин, Н.Б. Бакулина (Орлова)). В результате проведённых исследований описаны процессы спиновой переориентации в модели с замороженным с помощью оптических импульсов фемтосекундной длительности орбитальным моментом. В рамках этой модели вычислена зависимость спиновой намагниченности от времени при такой

переориентации Предложен упрощённый гамильтониан для описания оптического возбуждения электронов фемтосекундными лазерными импульсами. В этом приближении задача свелась к решению уравнений Блоха для дипольного момента электрона. Предложена модель сверхбыстрой магнитной динамики для описания перемагничивания ферромагнетиков после воздействия фемтосекундных лазерных импульсов. Модель предполагает, что процессы фемтосекундной длительности являются свойством орбитального, а не спинового магнетизма. Получены уравнения для описания оптического возбуждения электронов в электродипольном приближении. Анализ решений этих уравнений даёт условия, при которых оптическая накачка оставляет неравновесный электронный орбитальный угловой момент.

В институте активно развиваются методы магнитного неразрушающего контроля качества изделий. Теоретической основой описания задач неразрушающего контроля является классическая магнитостатика. Фактически при теоретическом исследовании рассматриваются два типа задач магнитостатики – прямая и обратная задачи (В.В. Дякин). В прямой задаче рассматривается магнетик с известной магнитной проницаемостью, помещённый в стороннее магнитное поле. Требуется определить распределение магнитных полей вне области, где помещён магнетик. В обратной задаче по известному (измеряемому) распределению магнитных полей вне тела нужно найти распределение магнитной проницаемости внутри тела, а также форму поверхности, ограничивающую объём тела. Сотрудниками лаборатории (В.В. Дякин, В.Я. Раевский, О.В. Кудряшова) было показано, что использование интегро-дифференциального уравнения, эквивалентного уравнениям Максвелла в магнитостатике, имеет много преимуществ по сравнению с подходом, основанном на дифференциальных уравнениях. Для этого интегро-дифференциального уравнения удалось доказать теорему существования единственности решения для распределения полей вне тела при любом распределении внешнего поля. Применение этого уравнения к обратной задаче позволяет установить, что первая часть обратной задачи не имеет единственного решения.

Вихретоковый метод, связанный с п-образным датчиком, изучен для контроля качества паяных соединений между сверхпроводящими шинами. Два других метода контроля качества, основанные на контроле рентгеновскими лучами и прямых измерениях электрического сопротивления, также изучались для сравнения. Установлено, что вихретоковый метод тестирования сверхпроводящих соединений имеет преимущества в сравнении с другими методами, такими как измерение удельного электрического сопротивления и рентгенологического исследования. Наблюдается хорошая корреляция между отчётами разработанного вихретокового прибора и размером дефектов припоя. Предложено для по-

вышения достоверности вихретокового контроля, учитывать вариации в поперечном сечении сростков (А.П. Ничипурук, Л.Х. Коган, Е.В. Розенфельд, Б.А. Худяков).

Свойства многокомпонентных сплавов на основе железа представляют большой интерес для практических приложений. Процессы фазовых превращений, распада пересыщенных твёрдых растворов и выделение избыточных фаз в этих сплавах интенсивно исследуются методами машинного моделирования. В этом случае при изучении свойств сплавов удается принять во внимание электронную структуру, величину и характер межатомных взаимодействий, магнитное состояние. В лаборатории теоретической физики это направление исследований также активно развивается.

Как известно, в стали и чистом железе имеет место смена механизмов фазового превращения с изменением температуры от мартенситного, связанного с неустойчивостью решетки к ферритному, сопровождаемому появлением и ростом зародышей, то есть превращению первого рода. Авторскому коллективу, в который входил Ю.Н. Горностырев, на достаточно простой модели удалось установить причины такого изменения. Модель основана на функционале Гинзбурга-Ландау, принимающем во внимание энергию деформаций и энергию межфазной границы. Плотность энергии тетрагональных деформаций определялась как функция плотности энергии парамагнитного состояния, параметра обменного взаимодействия и спиновой корреляционной функции, зависящей от температуры. Принято также во внимание возможное перераспределение углерода в системе. Используя теорию функционала плотности, было показано на основе численных расчётов, что отношение энергий магнитной и немагнитной фаз сильно изменяется с уменьшением температуры и ферромагнитная фаза становится более предпочтительной при температурах ниже температуры Кюри. Допирование углеродом не меняет эти соотношения. Таким образом, магнитное состояние играет главную роль в реализации структурных фазовых превращений в стали и железе.

В рамках теории функционала электронной плотности проведён расчёт энергий взаимодействия атомов углерода в парамагнитном ГЦК-железе. В расчёте был принят во внимание вклад тепловых магнитных флуктуаций и атомная релаксация в окрестности примеси. Показано, что между атомами углерода, находящимися в первой и второй координационных сферах (КС), существует сильное отталкивание. Установлено, что деформации в окрестности двух близлежащих атомов углерода мало отличаются от тех деформаций, которые создаются отдельными атомами углерода. Таким образом, энергия взаимодействия атомов углерода в первой координационной сфере обусловлена формированием химической связи и магнитными флуктуациями в окрестности каждого из этих атомов. Обнаружено, что для пары примесей, окружённых



Коллектив лаборатории теоретической физики в 2012 г.

атомами железа, обладающих локальным ферромагнитным упорядочением, возможно их взаимное притяжение. Последнее свойство может оказаться важным при анализе термодинамики переохлажденного аустенита (Ю.Н. Горностырев, И.А. Абрикосов).

Методом молекулярной динамики исследовано взаимодействие дислокаций с обогащёнными медью выделениями в матрице ОЦК-железа. Показано, что дислокации стимулируют развитие фазовой неустойчивости выделений ОЦК-меди в определённом интервале их размеров. Этот процесс сопровождается захватом дислокаций выделениями и даёт значительный вклад в упрочнение. Полученные результаты позволяют объяснить наблюдаемую зависимость упрочнения в системе Fe–Cu от размера выделений. (Ю.Н. Горностырев, Л.Е. Карькина, И.Н. Карькин).

В заключение отметим, что в рамках одной статьи невозможно отразить все результаты, полученные в лаборатории теоретической физики за годы её существования.

В.В. Меньшенин

ЛАБОРАТОРИЯ

теории нелинейных явлений

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Борисов Александр Борисович, *заведующий лабораторией, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, профессор*
- Баталов Сергей Васильевич, *старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.*
- Долгих Денис Витальевич, *научный сотрудник*
- Зыков Сергей Арленович, *научный сотрудник, к.ф.-м.н.*
- Зыкова (Демина) Екатерина Сергеевна, *младший научный сотрудник*
- Киселев Владимир Валерьевич, *главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.*
- Расковалов Антон Александрович, *старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.*
- Рыбаков Филипп Николаевич, *научный сотрудник*
- Шагалов Аркадий Геннадьевич, *главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.*

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ теории нелинейных явлений

Мы решили написать историю лаборатории от лица трёх ведущих сотрудников, которые делятся личными воспоминаниями. Во многих местах наш текст напоминает отчёт о научной работе, результаты которой отчасти изложены в монографиях [1–7]. Но, к сожалению, мы не могли найти другой формы.

Вспоминает Борисов Александр Борисович

Историю лаборатории теории нелинейных явлений уместно начать с начала 70-х гг., чтобы отметить прямой и косвенный вклад многих учёных не только в создание лаборатории, но и в мою личную судьбу. На старших курсах УПИ я самостоятельно интенсивно изучал теорию непрерывных групп Ли и теорию элементарных частиц. В конце четвёртого курса было распределение на курсовые работы, два из которых было в Дубну в ОИЯИ. В это время в лаборатории нейтронной физики ОИЯИ работал Б.В. Васильев, бывший сотрудник кафедры теоретической физики УПИ, ученик знаменитого И.К. Кикоина. В.М. Стоцкий дал мне контактные данные Б.В. Васильева. Б.В. горячо поддержал моё желание заниматься теорией и познакомил меня со своими друзьями – профессорами М.И. Подгорецким и В.И. Огиевецким. Последнему я сдал устный экзамен, и он согласился со мной работать. В.И. был учёным редкого таланта и культуры и сформировал меня как молодого учёного. В то время в теории поля были популярны идеи Голдстоуна о спонтанном нарушении симметрии. Он показал, что если теория инвариантна относительно группы G , а основное состояние инвариантно только относительно её подгруппы H , то такое спонтанное нарушение симметрии сопровождается появлением безмассовых (голдстоуновских) частиц. В качестве примера такого нарушения приводился ферромагнетик и магноны: в обменном приближе-

нии гамильтониан ферромагнетика инвариантен относительно трёхпараметрической группы трёхмерных вращений, а основное состояние инвариантно только относительно однопараметрической группы вращений вокруг спонтанной намагниченности. В 1969 г. появилась замечательная статья Вейса, Каллана и Зумино, в которой показано как конструировать лагранжиан голдстоуновских частиц при известных группах G и H внутренних симметрий (нелинейная реализация симметрии). Кроме того, с помощью нелинейной реализации группы (нелинейная сигма-модель) им удалось удовлетворительно описать низкоэнергетическую динамику пи-мезонов. В.И. Огиевецкий предложил мне исследовать модель, инвариантную относительно группы Лоренца, со спонтанным нарушением аффинной группы. В результате нам удалось показать, что теория гравитации является теорией спонтанного нарушения аффинной и конформных групп симметрии и гравитоны являются голдстоуновскими частицами. Установлена глубокая связь теории тяготения с теориями нелинейных реализаций внутренних групп симметрии, в частности, с киральной динамикой.

После двухгодичной стажировки в Дубне в 1975 г., я не мог остаться в этом городе, так был женат, у нас был ребёнок, а для прописки требовалась жилплощадь. Была устная договорённость Б.В. Васильева с Ю.А. Изюмовым о трудоустройстве в ИФМ, которая не получилась, о чём Ю.А. Изюмов позже сожалел. В.В. Зверев попросил помочь в моём трудоустройстве нашего однокурсника Я.Г. Смородинского. Я.Г. обладает удивительной коммуникабельностью и во время репетиции институтской оперной самодеятельности сообщил о моей персоне Г.Г. Талуцу. Последующая встреча с ним и определила всю мою судьбу в ИФМ. Г.Г. рекомендовал меня в теоретическую группу В.Т. Шматова лаборатории гидроэкструзии, в которой имелись свободные ставки. В.Т. был творческим человеком, но, к сожалению, любил опровергать традиционные подходы. При этом он допускал математические ошибки и не всегда признавал их. В 1976 г. из Ижевска приехал очень талантливый и исключительно работоспособный В.В. Киселев. В со-



В начале творческого пути: А.Б. Борисов и В.В. Киселев, 1978 г.

дружестве с ним и В.А. Фейгиным мы сделали несколько работ по взаимодействию дислокаций с микротрещинами.

После защиты кандидатской диссертации в Дубне, я усиленно искал интересную тему для дальнейшей научной работы, близкой к идеям по спонтанному нарушению симметрии. Неожиданно помогли два случая. Выискивая новую тематику, я просматривал много литературы, и в институте математики и механики нашёл в журнале «Функциональный анализ» замечательную статью В.Е. Захарова и А.Б. Шабата по методу построения солитонных решений в интегрируемых моделях, широко впоследствии известному как «метод одевания». Результаты этой статьи позволяли сравнительно просто чисто матричным способом находить солитонные решения. Второй случай – это удача. В комнате И.Ф. Мирсаева и В.В. Меньшенина я заметил интересную статью А.Ф. Андреева и В.И. Марченко по феноменологическим уравнениям гидродинамического типа для магнитных сред. Выяснилось, что их подход **совпадает с теорией спонтанного нарушения трёхмерной группы спиновых вращений**. Любая магнитная структура может быть охарактеризована тремя взаимно ортогональными векторами и динамика как упорядоченных, так и неупорядоченных магнитных сред описывается их локальным вращением. Независимо феноменологический лагранжиан спиновых волн в пространственно неупорядоченных средах был предъявлен в работах Д.В. Волкова и А.А. Желтухина. При учёте только обменных взаимодействий он совпадал с результатами, полученными в дипломной работе А.А. Желтухина еще в 1971 г. Д.В. Волков был выдающимся учёным в физике элементарных частиц и теории симметрии. Он рецензировал мою кандидатскую диссертацию, и встреча с прошлым придала мне силы для работы над новой тематикой.

Возникла идея, методом «одевания» найти солитоны в макроскопических динамических уравнениях магнитоупорядоченных сред (модель Андреева-Волкова-Марченко-Желтухина в обменном приближении). Этой проблемой мы с В.В. Киселевым стали «подпольно» заниматься и нам удалось построить солитоны новых моделей. Выяснилось, что солитоны в обменном приближении существуют в широком классе квазиодномерных магнетиков. Кроме того, для выявления структуры солитонов необходимо было развить «метод одевания», так как связанная с этими уравнениями $L-A$ – пара Лакса была эллиптической.

Публикация соответствующей статьи долго откладывалась и за это время такая же $L-A$ – пара была независимо получена И.В. Чередником без предъявления техники интегрирования. Наши результаты, доложенные мной на одной из Коуровских школ теоретиков, заинтересовали А.М. Косевича и он пригласил меня на семинар в Харьков. В Харькове я выступал на семинарах у А.М. Косевича, Д.В. Волкова и В.А. Марченко. Последний был одним из создателей обратной задачи рассеяния и его высокая

оценка нашей работы была особенно важной. От него и харьковских теоретиков я тогда узнал, что эллиптическая пара Лакса (без предъявления солитонных решений) была получена также в 1979 г. Е.К. Скляниным для ферромагнетика с двухосной анизотропией и метод интегрирования уравнений с эллиптической L-A – парой является одной из острейших проблем теории солитонов. Поэтому сразу по приезде в Свердловск были быстро выполнены и посланы в печать статьи по методу «одевания» для модели Ландау-Лифшица ферромагнетика с двухосной анизотропией и нового класса уравнений с эллиптической L-A – парой Лакса. Полученные результаты позволили мне войти в международное сообщество солитонщиков. Позднее для модели Ландау-Лифшица нами были получены уравнения Гельфанда-Левитана-Марченко традиционной формулировки метода обратной задачи рассеяния.

1981 г. произошли большие изменения в руководстве отдела высоких давлений. После ухода сильного организатора Б.И. Береснева и нескольких лет исполнения его обязанностей В.Т. Шматовым отдел возглавил Герман Германович Талуц. Как и С.В. Вонсовский, он обладал широкой эрудицией, ценил новые идеи, был сильным дипломатом и все конфликты решал медленно и осторожно. После разговора с А.М. Косевичем о результатах моей поездки в Харьков солитонная тематика вошла в планы института, а В.В. Киселев полностью и В.А. Фейгин отчасти стали ей заниматься. Отношения с В.Т. Шматовым не были омрачены скандалами, и в дальнейшем я старался его поддерживать. Г.Г. предложил для популяризации солитонов прочитать лекции для теоретиков в институте, что мы и сделали с Владимиром Валерьевичем. Помимо молодых учёных, лекции посещали В.П. Калашников и А.П. Танкеев. В.П. был прекрасным человеком и очень сильным теоретиком, мы подружились. Его советы часто помогали мне в жизни.

В 1983 г. состоялась вторая знаменитая конференция по физике нелинейных явлений в Киеве, куда мы поехали с Ю.А. Изюмовым. Мы были поражены большим количеством прекрасных докладов по различным областям физики, редким содружеством физиков и математиков и присутствием многих знаменитых учёных на ней. После приезда домой Ю.А. с присущей ему энергией, напористостью и стремлением к новым идеям организовал свой семинар по солитонам с нашими лекциями. В итоге я написал с ним работу по солитонам в простой спиральной структуре, а он вместе с В.М. Лаптевым выполнил цикл работ по рассеянию нейтронов на солитонной решётке в модулированных магнитных структурах.

К этому времени метод обратной задачи рассеяния (МОЗР) привёл к созданию целой области математической физики и в России сложились несколько сильных школ по МОЗР и солитонам. Впечатляющие результаты были получены в школе Л.Д. Фаддеева в Ленинграде, А.Б. Шабата в Уфе, С.П. Новикова в Москве и В.Е. Захарова в Черноголовке. По тематике института нам были близки

две школы по магнитным солитонам: школа В.М. Елеонского, Н.Е. Кулагина в Зеленограде и А.М. Косевича, Б.А. Иванова, А.С. Ковалева в Харькове. Все они стали нашими друзьями и сердечные отношения сохраняются до сих. Ю.А. Изюмов после киевской школы иногда подтрунивал надо мной, называя нас новой школой по солитонам. Я возражал ему, что нас всего двое. К сожалению, он оказался прав. Многие великие школы по нелинейной науке распались в начале 90-х гг., а мы не только сохранились, но приумножились и превратились в новую школу. В 2002 г. ушёл из жизни В.М. Елеонский, мой друг и автор многих блестящих работ по нелинейной физике. Он внёс огромный вклад в образование «солитонно – нелинейно – магнитного» сообщества, включающего Москву, Подмоскovie, Украину и Урал. В 1983 г. вышла монография А.М. Косевича, Б.А. Иванова, А.С. Ковалева «Нелинейные волны намагниченности. Динамические и топологические солитоны». В ней, как и в работах В.М. Елеонского, Н.Е. Кулагина, не использовался МОЗР, солитонные решения в магнетиках находились прямым интегрированием уравнений. В этой книге предсказаны вихри в ферромагнетиках, проведён блестящий анализ структуры магнитных солитонов и долгое время она была настольной для нас. На киевской конференции 1983 г. я познакомился с А.Б. Шабатом – замечательным учёным, яркой и неординарной личностью. Впоследствии мы подружились, и я много раз приезжал к нему в Уфу и Черноголовку, докладывая свои результаты.

В 1984 г. А.П. Танкеев показал мне статьи О. Худака (1982 г.) и Г.Е. Ходенкова (1982 г.), в которых прямым интегрированием 2D sine-Gordon уравнения были найдены одиночные двумерные вихревые структуры. Это уравнение имеет широкое применение в различных областях физики. В лёгкоплоскостном ферромагнетике оно описывает статическое распределение вектора магнитного момента в базисной плоскости. К этому времени сложилось ядро будущей лаборатории. На работу были приняты бронзовый призёр всероссийского конкурса дипломных работ Г.В. Хусаинова (Безматерных), С.Н. Ионов, вскоре ушедший в коммерческую структуру, и А.Г. Шагалов – опытный специалист по численному счёту, которым ранее никто не занимался в нашей группе. Поскольку аналитическое решение вихревых структур почти отсутствовало, мы вместе с А.П. Танкеевым, с разной степени участия, стали увлечённо заниматься магнитными вихрями 2D sine-Gordon уравнения, чтобы исследовать фазовые переходы типа Костерли-



Встреча с друзьями в Киеве. Слева направо: В.В. Киселев, А.Б. Борисов, А.С. Ковалев, Б.А. Иванов



Как молоды мы были. Середина 90-х годов. Слева направо:
А.Б. Борисов, В.В. Киселев, С.Н. Ионов, Г.В. Безматерных,
В.А. Фейгин

ца-Таулеса. Применяв преобразование Хироты, мы нашли многовихревые решения, в том числе решётки вихрей, которые позволили понять структуру и необычное взаимодействие вихрей. Из построенных А.Г. Шагаловым графиков стало ясно, что вихри и антивихри образуются пересечением доменных границ (солитонов). Поэтому такие вихри всегда имеют топологический заряд, равный четырём. Аналитические вычисления выявили необычное свойство взаимодействия вихрей – отсутствию аннигиляции вихрей с противоположными зарядами

ми в структурах с нулевым топологическим зарядом. Эти работы имели интересные продолжения:

1. Аналитические вычисления показали, что существуют особые конфигурации вихрей, которые связаны с полиномиально-экспоненциальными солитонами. К таким солитонам приводят кратные корни дисперсионных уравнений изящного метода Хироты. Обобщение метода Хироты для полиномиально-экспоненциальных солитонов было сделано Г.В. Безматерных, которая проявила большие комбинаторные способности при доказательстве определённого класса тождеств.

2. Совместно с В.В. Киселевым выполнена серия работ по аналитическому описанию нелинейных топологических дефектов в несоизмеримых магнитных и кристаллических структурах (см. воспоминания В.В. Киселева).

3. В результате численных расчётов, выполненных А.Г. Шагаловым, найдены различные типы вихрей, в том числе с топологическим зарядом равным единице. Такой вихрь представляет собой полубесконечную доменную стенку. В совместной работе с С.Н. Ионовым (1996 г.) впервые в мировой литературе сделана попытка решить краевую задачу методом обратной задачи для аналитического описания такой структуры и получены нестрогие результаты. К сожалению, до настоящего времени не существует универсального метода решения краевых задач нелинейных уравнений, обладающих L-A – парой. В работе А.Б. Борисова (2000 г.) на примере краевой задачи в полуплоскости для дискретной модели Тоды показано, что её решение сводится к следующей проблеме классической механики: определению начальных значений импульсов частиц при известных начальных координатах и интегралах движения.

В середине 90-х гг. наша группа пополнилась С.А. Зыковым, талантливым выпускником УрГУ, склонным к математическим аспектам теории солитонов. В 1995 г. А.Б. Шабат, уезжая в отпуск

из Черногловки, оставил мне препринт своей замечательной работы с А.П. Веселовым, по «одевающим цепочкам». Суть работы заключалась в построении последовательных преобразований Дарбу с периодическими граничными условиями. Такая процедура приводила к новым интегрируемым потенциалам. Их работа помогла нам с Сергеем Зыковым найти принципиально новый метод получения новых интегрируемых уравнений, названный процедурой «размножения» интегрируемых систем. Она позволяет, исходя из исходной интегрируемой модели, построить не только новые интегрируемые модели, но и ассоциированные с ними L-A – пары Лакса. Таким методом были найдены новые интегрируемые модели: sine-Gordon-2, модифицированные уравнения Каупа-Буссинеска, Ландау-Лифшица и Цицейки.

В начале 1998 г. произошло разделение отдела высоких давлений на две лаборатории. К этому времени несколько месяцев на столе директора института В.Е. Щербинина лежало заявление Ю.А. Изюмова об организации в его отделе новой лаборатории под моим руководством, которому мудрый Виталий Евгеньевич не давал «хода». Я всегда относился к Ю.А. Изюмову с глубоким уважением. Это был очень эрудированный талантливый теоретик с сильным характером, большим кругом научных интересов, который всегда отслеживал все новое в теоретической физике и стремился менять тематику работ. Однако я боялся, что при переходе в его отдел потеряю самостоятельность. По совету своих сотрудников, особенно А.Г. Шагалова, я попросил Г.Г. создать новую лабораторию единственно возможным тогда способом – объединением теоретиков с экспериментальной группой Б.И. Каменецкого. Одно из пожеланий нового директора В.В. Устинова состояло в том, чтобы дать теоретическое обоснование экспериментов группы Б.И. Каменецкого. В дальнейшем этим успешно занимались В.В. Киселев и Д.В. Долгих (см. далее). В должности зав. лаб. нелинейной механики я пробыл десять лет, а хорошие отношения с Изюмовым быстро восстановились. Одной из заслуг моего руководства лабораторией считаю сотрудничество с И.Ш. Трахтенбергом. Обладая исключительным талантом физика-экспериментатора, коммуникабельностью и незаурядной интуицией, он заметил в одной из больниц, что итальянские протезы при повреждении шейки бедра можно заменить на отечественные, сделанные на основе пористого титана. Мне удалось привлечь к этой работе С.Ю. Орлова и специалиста по титану В.И. Новожинова. Совместно с Уральским институтом травматологии и ортопедии имени В.Д. Чаклина удалось найти технологию изготовления имплантата из пористого титана на основе титана с покрытием. После получения патента она была передана медикам. К сожалению, И.Ш. Трахтенберг при определённом разгильдяйстве одного из сотрудника того же института (не был поставлен диагноз рака) ушёл из жизни. ИФМ потерял замечательного специалиста, а я друга.

Новое тысячелетие мы с В.В. Киселевым встретили в Дрездене, где небольшая конференция, организованная А.С. Ковалевым, была совмещена с трёхнедельной научной работой. Конференция была посвящена главным образом магнитным вихрям, предсказанным в начале 80-х гг. школой А.М. Косевича. Доклады на конференции и уникальные эксперименты по динамике магнитных спиралей и мишеней, выполненные в УрГУ Г.С. Кандауровой, возродили мой интерес к аналитической теории магнитных спиралей. Известно, что спиральные структуры составляют важнейший и наиболее богатый класс пространственных структур в активных средах. Спиральные галактики, моллюски, спиральные волны в реакции Белоусова-Жаботинского являются типичными примерами таких структур. Активные среды характеризуются непрерывным притоком энергии от источника каждому физически малому элементу и её диссипацией. Статическая устойчивость и существенная нелинейность являются характерными особенностями магнитных структур, наблюдаемых Г.С. Кандауровой. Они не исчезали после выключения магнитного поля – времена жизни мишеней и спиральных доменов на несколько порядков превышали период магнитного поля. Это позволяет рассматривать магнитные структуры типа мишеней и спиральных доменов, как стационарные магнитные дефекты, возбуждаемые накачкой энергии в магнитоупорядоченную среду и релаксирующие к термодинамически равновесному состоянию за достаточно длительное время. Тогда аналитические решения типа статических спиралей не были известны в физике нелинейных явлений. «Инженерная» теория магнитных спиралей была построена совместно с Ю.И. Ялышевым. Аналитическое описание сложных магнитных конфигураций, в том числе спиралей, возможно только при учёте обменных взаимодействий и справедливо только вблизи ядра структуры. Для их описания были предложены специальные типы подстановок и дифференциально-геометрический метод интегрирования нелинейных уравнений (Борисов, 2006 г.). В этом методе с помощью преобразования годографа вводятся новые переменные, связанные с компонентами метрического тензора, индуцированного таким преобразованием. Тогда искомая модель переписывается в терминах компонент метрического тензора. Поскольку исходные пространственно-временные координаты были евклидовы, тензор кривизны в терминах введённой метрики равен нулю. Это уравнение становится главным, а исходное уравнение является его редукцией. Решения для компонент метрического тензора позволяют найти решения для первоначального нелинейного уравнения в виде неявных функций. Дифференциально-геометрический даёт широкий класс решений, получение которых другими методами крайне затруднено. В результате дано полное аналитическое описание вихревых спиральных структур и их взаимодействий в двумерной и трёхмерной моделях Гейзенберга (Борисов, 2001 г., 2002 г.). Для модели модели

Андреева-Волкова-Марченко-Желтухина (в обменном одноконстантном приближении) найдены одиннадцать магнитных текстур, включающие двумерные и трёхмерные вихревые и спиральные структуры, солитоны, трёхмерные источники, кноидальные «ежи», нелокализованные структуры и дефекты со степенью отображения равной единице, сходные по некоторым своим свойствам с топологическими солитонами и др. (Борисов, 2006 г.) Многие из этих решений определяются произвольными функциями. Стало ясно, что в магнетиках существует богатейший набор дефектов и структур, важных для будущих экспериментов. Особые типы двумерных спиральных структур в ферромагнетиках найдены в 2004–2005 гг. в плодотворном сотрудничестве с сильной группой теоретиков УрГУ (А.С. Овчинников, И.Г. Бострем). В частности, проведено численное моделирование двумерных спиральных спиновых конфигураций, предсказанных континуальной теорией. Показано, что спины, закреплённые локальным полем или анизотропией, могут быть причиной появления спиральных структур как для XY, так и для гейзенберговской моделей. В 2009 г. в сотрудничестве с той же группой предсказан солитон в несоизмеримой магнитной структуре (на фоне квазиодномерной решётки солитонов).

Как мне любезно сообщила Г.С. Кандаурова, в её экспериментах магнитные мишени – системы концентрических доменов образуются только вокруг индентора. Стало ясно, что его внедрение в магнитную плёнку создаёт локальное поле упругих напряжений, которое через магнитоупругое взаимодействие создаёт локальную анизотропию. Аналитическая формула для неё, зависящая от приложенного к индентору напряжения, толщины плёнки, получена вместе с новой сотрудницей Е.С. Деминой. Результаты численных расчётов мишени, проведённые совместно с С.А. Зыковым, удовлетворительно согласуются с экспериментом.

В 2008 г. меня пригласил директор института В.В. Устинов и сообщил важное решение – организовать на основе нашей теоретической группы (9 сотрудников) новую лабораторию теории нелинейных явлений в составе теоретического отдела. Это решение обрадовало всех. Экспериментальная группа перешла в лабораторию прочности А.Ю. Волкова.

В 2003–2004 гг. лабораторию стал посещать увлечённый наукой студент старших курсов УГТУ-УПИ Филипп Рыбаков, встреча с которым не только дала новое плодотворное научное направление лаборатории, но и существенно повлияла на мою дальнейшую научную деятельность. После окончания УГТУ в 2005 году он попросился в аспирантуру. Я выразил сомнение в успехе поступления, так как до сдачи экзаменов оставалась неделя. Тем не менее, Филипп сдал экзамены и стал работать в нашем институте. В то время я интенсивно работал над решениями уравнений Ландау-Лифшица, стараясь найти в них структуру хопфиона. Хотя понятие хопфиона в математике известно с тридцатых годов про-



2012 г. Слева направо: А.Б. Борисов, Ф.Н. Рыбаков, С.В. Баталов, А.А. Расковалов, С.А. Зыков, В.В. Киселев, А.Г. Шагалов

шлого столетия, в теоретической физике интерес к ним возродился после работ Л.Д. Фаддеева, И.Е. Дзялошинского и Б.А. Иванова. Хопфион представляет собой трёхмерный локализованный топологический солитон. Его трёхмерное распределение намагниченности можно представить системой зацепляющихся вихревых колец. Прообраз полярного угла намагниченности есть деформированный тор. Аналитическое решение для хопфиона может быть найдено только при определённых гипотезах о структуре вихревых колец или тора, в предположения об ортогональности линий постоянных значений полярного и азимутального угла намагниченности и т. п. Оригинальные программы численных вычислений, составленные Ф.Н. Рыбаковым, позволили предсказать и исследовать структуры статических и динамических хопфионов в анизотропных ферромагнетиках. Численные расчёты показали, что соотношение ортогональности выполняется не строго, а с точностью до двух процентов. С этого времени гипотезы о структуре трёхмерных солитонов мы уже не используем. Главный упор делается на численное моделирование. Аналитические вычисления стали играть вспомогательную роль. Они полезны только при исследовании асимптотик, анализе поведения структур вблизи особых точек и т. д. Трёхмерные хопфионы – новые фундаментальные объекты наномангнетиков могут найти применения в запоминающих устройствах с большой плотностью записи информации.

В последние годы несомненный интерес вызывает изучение спиновых текстур в гелимагнетиках, где основным состоянием является спиральная структура – одномерная солитонная решёт-

ка, а взаимодействие Дзялошинского-Мория стабилизирует двумерные и трёхмерные локализованные конфигурации. С годами Ф.Н. Рыбаков стал одним из ведущих сотрудников лаборатории, прекрасно владеющий как численными, так и аналитическими методами. Он полностью освоил и модернизировал многие вычислительные методы исследования магнитных систем в рамках модели классических спинов: прямая минимизация методом нелинейных сопряженных градиентов, имитация отжига и метод Монте-Карло, метод «подталкивания упругой ленты» для расчёта энергетических барьеров, вычислительные алгоритмы на архитектуре Nvidia CUDA. С помощью сочетания аналитических и численных подходов исследована наблюдаемая в экспериментах структура магнитных спиралей и предсказаны спиральные решётки в киральных магнетиках. Впервые исследована трёхмерная структура киральных скирмионов и их решёток в плёнках кубических гелимагнетиков. Установлены физические механизмы, отвечающие за стабильность скирмионной решётки в широком диапазоне значений внешнего магнитного поля. Показано, что вопреки распространённому мнению, киральные скирмионы модулированы по толщине магнитной плёнки. Их структура представляет собой суперпозицию конической модуляции вдоль оси скирмиона и вращений в плоскости плёнки. Эти результаты объясняли ряд явлений, не нашедших ранее должного теоретического обоснования. Предсказаны и экспериментально обнаружены новые типы трёхмерных солитонов – «киральные поплавки» – частицеподобные состояния, локализованные в трёх измерениях вблизи свободной границы образца. Такие солитоны содержат точку Блоха, которая оказывается заблокированной на пути к открытой границе, т.к. поверхностные кручения намагниченности создают высокий энергетический барьер. Многие работы по гелимагнетикам выполнены совместно с зарубежными коллегами, с которыми Ф.Н. Рыбаков установил тесное сотрудничество.

Вспоминает Киселев Владимир Валерьевич

После окончания Уральского университета я был направлен в Ижевск во вновь организованный на базе пединститута Удмуртский университет. Там не хватало преподавателей нового набора дисциплин. Зав. кафедрой теоретической физики был бледен и измотан. Он один проводил занятия до шести пар в день. Однако все ставки были заняты прежними педагогами. Формально они выполняли хозяйственные работы. Моё появление оказалось полной неожиданностью для новых ректора и проректора. Они предложили на выбор койку в общежитии и хозяйственный договор сроком на один год или отказ от распределения. Я предпочёл второе, не подозревая, что найти работу по специальности в Свердловске весьма трудно, а без прописки невозможно. После безрезультатных скитаний я, наконец, это осознал и с отчаяния обратился сразу

к Богу. Богом для меня был академик Сергей Васильевич Вонсовский. С.В. внимательно меня выслушал и отвёл к директору ИФМ Михаилу Николаевичу Михееву. Так в я оказался в лаборатории гидрорэкструзии в теоретической группе В.Т. Шматова и поселился в общежитии (1976 г.). Позже я узнал, что С.В. внёс похожие коррективы в судьбы многих людей. Он никогда не был равнодушен к чужой беде. Доброжелательная атмосфера творческого сотрудничества, которая до сих пор сохраняется в ИФМ – это черты характеров и продолжение жизни его основателей.

Кроме меня в группу теоретиков входили А.Б. Борисов, В.А. Фейгин и ещё два человека, которые вскоре ушли из института. Знакомство с Александром Борисовичем Борисовым полностью изменило и обогатило мою дальнейшую творческую жизнь. По-видимому, нам обоим повезло, что встретились. А.Б. поступил на работу в ИФМ после не продолжительной, но весьма успешной работы в ОИЯИ (г. Дубна) под руководством известного физика-теоретика В.И. Огиевского. Кандидатская работа А.Б. по теории гравитации до сих пор цитируется. Принципы динамической симметрии, которые лежат в её основе, обладают большой общностью. Они эффективны для построения феноменологических лагранжианов нелинейной динамики голдстоуновских мод не только в теории поля и физике элементарных частиц, но и для любых конденсированных сред со спонтанным нарушением симметрии. От А.Б. я узнал следующее.

Возникновение магнитоупорядоченных состояний всегда сопровождается явлением спонтанного нарушения симметрии обменных взаимодействий – гамильтониан обменных взаимодействий инвариантен относительно любого поворота всех атомных спинов кристалла на один и тот же угол, но никакая магнитная структура не является инвариантной относительно таких поворотов. Обменные взаимодействия являются наиболее сильными по сравнению с магнитоанизотропными и главными при формирование магнитных структур. В работах Андреева-Волкова-Марченко-Желтухина (АВМЖ) была предложена новая феноменологическая теория магнетизма, которая исходит из симметрии обменных взаимодействий. При таком подходе любая равновесная обменная магнитная структура может быть охарактеризована не более чем тремя, причём взаимно ортогональными, магнитными векторами. С качественной точки зрения каждая равновесная обменная структура выделяет одно из состояний магнетика и, тем самым, нарушает симметрию обменных взаимодействий. Вследствие этого в системе появляются голдстоуновские возбуждения – магноны, стремящиеся восстановить нарушенную симметрию. Принципы динамической симметрии дают явное выражение для лагранжиана нелинейной динамики спиновых волн с наименьшей энергией возбуждения. Подход АВМЖ основан на общих соображениях симметрии. Интересно и важно, что он резко

сокращает число полей, необходимых для описания нелинейной динамики магнетиков и не использует традиционного представления о магнитных подрешётках, которое во многих случаях является избыточным и усложняет теоретическое описание магнитных сред. Хотя основные уравнения альтернативной теории проще уравнений Ландау-Лифшица для намагниченностей подрешёток, в области своей применимости новый феноменологический подход согласован с прежним.

А.Б. объяснил мне, что в рамках подхода АВМЖ основные уравнения многоподрешёточных магнетиков напоминают таковые для системы механических волчков. В малых объёмах среды сохраняется идеальная обменная структура, которая характеризуется не более чем тремя жёстко сориентированными по отношению друг к другу магнитными векторами неизменной длины. В возбуждённых состояниях магнетика при переходе от одного малого объёма среды к другому эти векторы поворачиваются как единое целое относительно неподвижной системы координат в спиновом пространстве. Постоянные феноменологического лагранжиана спиновых волн определяют жёсткость связей таких триад-волчков друг с другом и с основным состоянием магнетика.

Хорошо известно, что уравнения механического волчка при определённых условиях допускают точные решения. Поэтому у А.Б. возникла идея выделить новые интегрируемые модели магнетизма в рамках подхода АВМЖ. Меня покорила глубина и широта его идей и творческие замыслы. Мы стали работать вместе.

В то время исследования по нелинейной физике испытывали резкий подъём, благодаря открытию новых методов интегрирования большого числа универсальных физических моделей. Под интегрируемостью далее понимается весьма сильное утверждение: возможность построения всех решений модели в определённом классе функций, например, убывающих на бесконечности. Важное место среди интегрируемых моделей занимают динамические уравнения Ландау-Лифшица одноподрешёточного ферромагнетика с одноосной и двухосной анизотропией. Многоподрешёточные магнетики чаще используются на практике, однако распространение на них новых методов нелинейной физики сдерживается наличием большого числа подрешёток при традиционном подходе.

Благодаря А.Б., я познакомился с аналитическим аппаратом теории солитонов и научился его применять. Первый шаг общей схемы интегрирования нелинейного уравнения в частных производных методом обратной задачи рассеяния (МОЗР) состоит в том, чтобы представить нелинейное уравнение в форме условия совместности вспомогательной системы линейных дифференциальных уравнений. Иными словами, для нелинейного уравнения необходимо найти представление Лакса. Тогда с помощью методов теории функций комплексной переменной можно перейти от исходных полевых переменным к новым обобщённым переменным.

В новых переменных нелинейное уравнение распадается на ряд не зацепляющихся линейных уравнений, которые легко интегрируются. После обращения замены переменных получаем полное решение исходного нелинейного уравнения. Важно, что все этапы интегрирования нелинейного уравнения связаны с решением определённых линейных задач. В результате открывается уникальная возможность подробного описания существенно нелинейных явлений и процессов.

Используемые при интегрировании обобщённые переменные отвечают допустимым типам возбуждений в системе и образуют две группы. К первой из них относятся переменные непрерывным образом зависящие от спектрального параметра. В реальном пространстве они параметризуют нелинейные волны с преобладанием дисперсии. Малоамплитудные волны соответствуют идеальному газу квазичастиц традиционной линеаризованной теории. Ко второй группе принадлежит дискретное множество переменных, которым отвечают совершенно другие частицеподобные волны – солитоны. Солитоны обладают свойством стабильности при взаимодействиях друг с другом и диспергирующими волновыми пакетами. Если произвольный волновой импульс достаточно большой амплитуды рассматривать в течении длительного времени, то содержащиеся в нём «радиационные» компоненты расплываются из-за дисперсии, а солитоны остаются как локализованные возбуждения неизменной формы. В этом отношении происхождение слова «солитон» такое же, как и «солист» – это солирующие состояния. Именно поэтому они определяют основные физические свойства конденсированных сред при сильных внешних воздействиях. В то же время, начальные волновые импульсы малой амплитуды, для которых малы эффекты нелинейности среды, не образуют солитонов, а расплываются из-за дисперсии.

Приведённые пояснения позволят лучше понять и оценить полученные нами результаты.

В рамках подхода АВМЖ нам удалось выявить новые интегрируемые осесимметричную и асимметричную киральные модели, которые типичны для многоподрешёточных неколлинеарных ферри- и антиферромагнетиков. Например, осесимметричная модель описывает магнитные возбуждения в шестиподрешёточных антиферромагнетиках со структурой типа γMnO_3 . Это позволило предсказать и аналитически описать новые типы «многоподрешёточных» солитонов, детально исследовать изменение их внутренней структуры и «разрушение» при взаимодействии с нелинейными волнами намагниченности.

Асимметричная киральная модель, как и модель Ландау-Лифшица для ферромагнетика с двухосной анизотропией, имеет алгебраический закон дисперсии линейных мод: $\omega = \sqrt{P_4(k)}$, где $P_4(k)$ – полином четвёртой степени по волновому числу k . Для интегрирования таких моделей требовалось обобщение МОЗР.

Это было сделано нами и А.В. Михайловым независимо (предложена оригинальная процедура «одевания» частных решений с помощью задачи Римана на торе).

Мы также установили, что уравнения Ландау-Лифшица двухподрешёточного изотропного ферромагнетика сводятся к интегрируемой модели. Современные методы выращивания тонких плёнок феррит-гранатов на немагнитных подложках, позволяют получать монокристаллы ферритов с практически любыми наперёд заданными свойствами. В силу это ферриты находят широкое применение в современной технике. Мы впервые исследовали солитоны в таких системах. Интересно и важно, что предложенная модель оказалась универсальной: позволила исследовать широкий класс двумерных солитоноподобных волн в гейзенберговском ферромагнетике, а также квантованные состояния двумерных дисклинаций в изотропном антиферромагнетике.

С помощью развитых методов в ферромагнетике с анизотропией типа «лёгкая плоскость» мы проанализировали изменение внутренней структуры солитонов под действием внешнего магнитного поля, а также их поведение в поле бегущей нелинейной волны прецессии большой амплитуды. Магнитное поле, направленное вдоль оси анизотропии, снимает вырождение основного состояния и приводит к большому разнообразию солитонов с интересными физическими свойствами.

Когда на Учёном совете я представил тезисы нашего доклада о магнитных солитонах на конференцию в Тулу, С.В. Вонсовский лучезарно улыбнулся и подытожил: «В Тулу лучше ехать со своим уральским самоваром».

Официально мы не могли заниматься захватывающе интересной физикой магнитных солитонов. В.Т. Шматов тогда временно исполнял обязанности заведующего лабораторией гидроэкс্তুзии и высокое давление было сродни его характеру. Он наложил категорическое вето на наши предложения в области солитоники. В рамках линейной теории упругости мы вычисляли поля различных дислокационных конфигураций, описывали акустическую эмиссию движущихся дислокационных систем, исследовали поведение трещин под давлением. В.А. Фейгин под руководством А.Б. Борисова написал и защитил кандидатскую диссертацию о взаимодействии дислокаций и трещин в гидростатически сжатой среде.

Однако мы были молоды и по солитонной тематике успевали работать параллельно и под прикрытием: на столе у А.Б. всегда лежал том «Разрушение», раскрытый на одной и той же странице с рисунком трещины. А.Б. щедро делился со мной знаниями, опытом, идеями и быстро многому научил. Выглядело это так. Мы садились за его большой стол с огромным листом бумаги. На нём А.Б. начинал что-либо объяснять и писать. Когда уставал, отдавал лист мне, и я продолжал вычисления. По вечерам задерживались на работе, дома, вопреки плохим жилищным условиям, постоянно что-нибудь вычисляли.

В 1981 г. лаборатория гидроэструзии была преобразована в отдел высоких давлений. Его возглавил Герман Германович Талуц. Он радовался успехам каждого сотрудника. Это воодушевляло людей и проявилось в целой серии достойных работ и защит. Я благодарен Г.Г. за помощь и поддержку, которую он оказал и мне при защите кандидатской, а затем докторской диссертаций. Первая из них называлась «Динамические солитоны в магнетиках с несколькими магнитными подрешётками» (1984 г.), вторая – «Топологические дефекты и солитоны в несоизмеримых магнитных и кристаллических структурах» (1999 г.). Г.Г. внимательно прочёл обе рукописи и внёс конструктивные предложения по их улучшению.

Отдел высоких давлений состоял из нескольких лабораторий, которые занимались исследованием пластических и прочностных свойств металлов, а также изучением магнитных и структурных фазовых переходов под давлением. В формировании механических свойств кристаллов, неоднородных состояний и фазовых переходов решающую роль играют топологические дефекты. В континуальной теории топологические дефекты описываются полями с особенностями, которые нельзя устранить, не разрушая упорядоченного состояния в большом объёме вещества. Топологические дефекты существенно нелинейны по своей внутренней природе и происхождению. В отличие от дефектов линейной теории упругости, они богаче по строению, обладают специфическими особенностями взаимодействия. Мы решили применить методы теории солитонов для анализа нелинейных дефектов.

Сначала в работе А.Б. Борисова и В.В. Киселева были построены новые решения нелинейной и нелокальной модели Пайерлса для дислокаций. Затем были выполнены комплексные исследования нелинейных дефектов в рамках двумерной модели типа Френкеля-Конторовой (эллиптическое уравнение sine-Gordon). Она имеет множество экспериментальных реализаций и учитывает основные взаимодействия со- и несоизмеримых магнитных структур и двумерных кристаллов. В магнетиках таковыми являются обменное взаимодействие и кристаллографическая анизотропия. Модель допускает представление Лакса, и потому является интегрируемой. Однако МОЗР хорошо работает только для волновых уравнений, когда по начальному распределению поля требуется проследить его дальнейшую эволюцию. Методы теории солитонов сталкиваются со значительными трудностями при их распространении на краевые задачи по расчёту полей дефектов. В общем случае невозможно найти отображение краевых условий, сформулированных для исходных полей, в краевые условия для переменных, которые используются при интегрировании модели. Поэтому даже в интегрируемом случае для изучения нелинейных дефектов требуются особые методы.

В работах А.Б. Борисова, А.П. Танкеева специальными постановками удалось получить статические решения двумерной

модели, которые являются аналогами солитонов. Далее будем называть их солитонными вихрями. В магнетиках с однородным основным состоянием ядро любого солитонного вихря представляет собой ортогональное пересечение двух доменных границ. После пересечения доменные стенки меняют свою хиральность. Оказалось, что все солитонные вихри имеют сравнительно большой топологический заряд. В работах А.Б. Борисова, А.П. Танкеева, С.Н. Ионова, А.Г. Шагалова, аналитическими и численными методами показано, что вихри с меньшими топологическими зарядами, а значит и энергией, принадлежат непрерывному спектру обратной задачи рассеяния и представляют собой струнные конфигурации из отрезков доменных границ. Для расчёта полей симметричных струнных конфигураций был использован приём аналогичный методу изображений в электростатике.

В работах А.Б. Борисова, В.В. Киселева на основе модификации метода обратной задачи рассеяния в рамках той же модели получены пионерские результаты по аналитическому описанию нелинейных топологических дефектов в несоизмеримых (полосовых доменных) магнитных и кристаллических структурах. Наличие нетривиального основного состояния типа полосовой доменной структуры делает невозможным анализ таких дефектов какими-либо другими методами. Были предсказаны и впервые аналитически описаны различные солитоноподобные дефекты (включая решётки из солитонных вихрей), а также не принадлежащие солитонному сектору симметричные двумерные дефекты в полосовой доменной структуре, являющиеся прообразами блоховских линий и магнитных дислокационных диполей. Солитонные дефекты полосовой структуры образуются в результате пересечения и перекручивания доменных границ структуры. Для них удаётся получить явные выражения. Для расчёта полей существенно нелинейных несолитонных дефектов получены линейные интегральные уравнения с известными ядрами.

Интересно, что в несоизмеримой фазе, как и в соизмеримой, два солитонных вихря с противоположными топологическими зарядами не могут сблизиться на расстояние меньшее удвоенной ширины образующих их доменных стенок. Это приводит к существованию «энергетической щели», которая препятствует термофлуктуационному зарождению вихревой пары. В то же время, в периодических структурах из солитонных вихрей (в двумерных решётках или цепочках) вихрей нет ограничения на расстояние между ядрами соседней пары вихрь – антивихрь. Поскольку при сближении вихря и антивихря энергия их ядер понижается – формирование периодических вихревых решёток – специфическая черта рассмотренных двумерных систем, связанная с нетривиальным характером взаимодействия вихрей.

Для несолитонных дефектов в несоизмеримой (полосовой доменной) структуре получены асимптотические формулы, удоб-

ные для экспериментальной проверки результатов. Показано, что каждый нелинейный дефект характеризуется собственным полем струнной конфигурации из доменных стенок его ядра, которое экспоненциально убывает с расстоянием. Кроме того, ядро дефекта вызывает деформации полосовой доменной структуры, которые медленно (по степенному закону) спадают при удалении от центра дефекта, поэтому даже на больших расстояниях выявляют его топологические свойства.

Последнее позволило предложить упрощённый подход для расчёта полей дефектов, который сравнительно легко воспроизводит результаты, известные для симметричных вихревых диполей, даёт аналитическое описание новых дефектов, не обладающих симметрией. В таком подходе мы задаём данные непрерывного спектра обратной задачи рассеяния так, чтобы на больших расстояниях от дефекта они соответствовали полю дефекта в линеаризованной теории. В результате исследованы «несолитонные» нелинейные дефекты в конденсированных средах, по своим топологическим свойствам аналогичные дефектам линейной теории упругости: дислокационным и дисклинационным диполям, трещинам, точечным дефектам и т.д. В магнетиках они являются прообразами магнитных дисклинаций, гантелеобразных и спиральных доменов, спиральных вихревых диполей – отрезков доменных границ со спиральным закручиванием вблизи концов, «мишеней» из кольцевых доменов. Проанализированы внутреннее строение различных «несолитонных» дефектов на фоне однородного состояния среды и при наличии полосовой доменной структуры, особенности взаимодействия нелинейных дефектов друг с другом и с плоскопараллельной доменной структурой.

Интерес к средам со сложной структурой стимулируется уникальным сочетанием их физических характеристик: магнитных, упругих, электрических, оптических и других. Последнее делает эти материалы весьма перспективными с точки зрения практического использования в вычислительной технике и микроэлектронике, различных приборах и устройствах. Теоретическое описание нелинейных явлений в реальных системах может быть получено посредством построения в каждой области характерных пространственно-временных масштабов своих эффективных моделей, корректно учитывающих основные взаимодействия и в то же время допускающих точные решения.

Поэтому в серии моих работ, в том числе в соавторстве с А.П. Танкеевым, были развиты специальные варианты редукированной теории возмущений для магнитных, упругих и магнитоупругих сред, теоретическое описание которых вызывает затруднения из-за наличия сверхструктур, нелокальных магнитостатических взаимодействий, спонтанных деформаций, процессов резонансного обмена энергией между различными ветвями спектра линейных мод. С помощью упрощённых нелинейных моделей получены следующие результаты.

В антиферромагнетиках с геликоидальной структурой и в магнитоупругих средах исследованы процессы перекачки энергии в области интенсивного резонансного взаимодействия активационной и бесщелевой мод. Найдены условия формирования различных солитонных режимов в окрестности нелинейного резонанса длинных и коротких волн.

Изучены основные особенности нелинейной и нелокальной динамики ферро- и антиферромагнитных плёнок. В частности, описаны квазисолитоны вблизи точек нулевой дисперсии и новые слаболокализованные состояния, формирование которых связано с конкуренцией обменной и нелокальной магнитостатической дисперсий, влиянием поверхности образца.

Показано, что в окрестности точки ферроупругого мартенситного фазового перехода слабонелинейная динамика фононных мод допускает формирование $2D+1$ мультисолитонных состояний. Предложен солитонный механизм аномальной акустической эмиссии вблизи точки фазового перехода.

Мы активно и с энтузиазмом работали, поэтому в 1998 г. из отдела высоких давлений была выделена лаборатория «Нелинейной механики». Её заведующим стал А.Б. Борисов. Новая лаборатория объединила теоретиков с экспериментальной группой Бориса Исааковича Каменецкого.

В работах Б.И. были экспериментально выявлены возможности управления неустойчивостями металлических оболочек в условиях внешнего гидростатического сжатия. Найдены диапазоны давлений, материальных и геометрических параметров оболочек, при которых первоначально круговая цилиндрическая оболочка после потери устойчивости приобретает заданную жёсткими связями форму поперечного сечения. Это чрезвычайно важно для создания новых высокопроизводительных материалов – и энергосберегающих технологий получения из трубных заготовок полых изделий сложной формы (трубчатых с переменным сечением по длине, призматических с квадратным, шестигранным, любым зубчатым сечением).

Теоретическое описание таких процессов даже на начальной стадии деформирования материала, когда на поверхностях оболочек формируются нелинейно-упругие «узоры» из пространственно локализованных вмятин, является одной из наиболее сложных задач механики и физики конденсированного состояния. В такой ситуации первостепенную роль приобретают рациональная постановка задачи, её оправданные упрощения и получение приближенных решений. Для этого в работах В.В. Киселева и Д.В. Долгих были предложены варианты редукированной теории возмущений, которые позволяют привести трёхмерные динамические уравнения нелинейной теории упругости для пластин, слоистой среды и оболочек к более простым двумерным и одномерным моделям. Получены новые существенно нелинейные модели, которые

корректно учитывают граничные условия на поверхностях образцов, взаимодействие продольных и поперечных мод деформации материала, геометрическую и физическую нелинейности среды, изменения инерционных свойств деформируемых поверхностей из-за локальных изменений их кривизны. На этой основе аналитически описаны узоры из вмятин и новые типы солитонов, которые образуются на поверхностях перечисленных систем на начальной (нелинейно-упругой) стадии изменения их формы.

Узоры из вмятин являются концентраторами напряжений и «предвестниками» пластического деформирования оболочки.

Солитоны, образующиеся вблизи порога неустойчивости формы оболочки, имеют важное значение для нелинейной акустической диагностики её предкритического состояния.

Д.В. Долгих перешёл в нашу группу в 2003 г. от В.В. Губернаторова с напутствием описать гофрирование сильно нагруженных слоёв среды при сдерживающем влиянии соседних слабо нагруженных и потому устойчивых слоёв материала. Эффект локализации изгибов существенно отличает такую задачу от линейной эйлеровой задачи о неустойчивости упругих систем. Без плодотворной и надёжной помощи Д.В. Долгих я не отважился бы на трудоёмкий анализ этой и других задач. Он тщателен в расчётах и не заменим при выполнении численного моделирования.

В последние годы с помощью упрощённых моделей аналитическими и численными методами мы исследовали гофрирование круговой цилиндрической оболочки жидкостью высокого давления при наличии двух жёстких связей: внешней ограничивающей полости и призматического стержня с переменным сечением внутри оболочки. Найдены конфигурации связей, которые позволяют управлять локальными изгибами и концентрацией напряжений в угловых точках поперечного сечения оболочки на нелинейно-упругой стадии изменения её формы.

В 2008 г. теоретическая группа была отделена от экспериментальной и получила название: «Лаборатория теории нелинейных явлений». Её заведующий, Борисов Александр Борисович, никогда не пасовал перед трудностями и полностью оправдал свои фамилию, имя и отчество. В 2011 г. он был избран членом-корреспондентом Российской академии наук.

По совместительству я читаю лекции по теоретической физике на физико-техническом факультете УрФУ. Специфика новой системы образования в том, что уже на третьем курсе студенты должны обладать знаниями физики конденсированного состояния, достаточными для работы над бакалаврским дипломом на четвёртом курсе. Настоятельную необходимость соответствующей учебной литературы ощутил сразу, поэтому написал книгу «Квантовая макрофизика». Директор ИФМ академик В.В. Устинов её одобрил, и она вышла в задуманной им серии научно-образовательных изданий УрО РАН.

Студенты с аналитическим складом ума, живым интересом к науке встречаются крайне редко. Одного из них, А.А. Расковалова, удалось заинтересовать физикой нелинейных явлений. Мы сразу приступили к работе. Его бакалаврский диплом «Взаимодействие доменных границ и бризеров с волнами намагничённости произвольной амплитуды» был признан лучшей студенческой работой и получил медаль РАН. Затем была исследована нелинейная динамика спиральных магнитных структур. Обе задачи эффективно решены в рамках универсальных квазиодномерных моделей Ландау-Лифшица и синус-Гордон, благодаря нетривиальному обобщению МОЗР, и не поддаются исследованию пертурбативными или какими-либо другими ранее известными методами. Наши публикации получили премию МАИК. В 2012 г. А.А. Расковалов досрочно защитил кандидатскую диссертацию и сейчас успешно трудится в нашей лаборатории. В сотрудничестве с ним найдены новые точные решения модели Ландау-Лифшица для ферромагнетика с анизотропией типа «лёгкая ось», описывающие взаимодействие нелокализованной волны намагничённости с солитоноподобными объектами – доменными стенками, зародышами перемагничивания, бризерами. Показано, что режимами осцилляций намагничённости, скоростью доменных стенок и зародышей перемагничивания можно управлять, изменяя волновое число и амплитуду волны накачки. Показано, что солитоны в спиральных структурах магнетиков и мультиферроиков являются переносчиками макроскопических сдвигов структуры, и при определённых условиях служат зародышами перемагничивания материала. Структура солитонов неразрывно связана с неоднородным основным состоянием. При больших скоростях движения солитона к его ядру начинают периодически примыкать протяжённые «предвестники» и «хвосты» из колеблющихся доменных стенок структуры. Частоты пульсирующих солитонов лежат в энергетической щели спектра линейных мод структуры. Выявлены возможности наблюдения разных типов солитонов и способы их генерирования. Впервые показано, что даже при наличии неоднородного сильно нелинейного основного состояния существует замечательное разделение переменных, при котором энергия и другие интегралы движения любого локализованного распределения намагничённости в спиральной структуре записываются в виде сумм независимых вкладов только от солитонов и диспергирующих волн.

Вспоминает Шагалов Аркадий Геннадиевич

Я пришел в Институт физики металлов в группу А.Б. Борисова в 1988 г. уже сложившимся учёным с большим опытом численных исследований в физике нелинейных явлений. Не составило труда сразу же начать работу в области исследования вихрей, теорию которых тогда активно развивала эта группа. Моя роль состояла в инициации численного исследования вихрей в конденсирован-

ных средах. Часть успехов в этой области, связанная с численными методами, уже были описаны выше А.Б. Борисовым в данной статье. Остановлюсь лишь на серии работ, выполненных в начале 90-х гг. и связанных с численным моделированием динамики вихрей. В это время актуальными были проблемы образования спиральных доменов и других сложных структур в ферромагнитных плёнках, помещённых в переменное поле (Г.С. Кандаурова, Ф.В. Лисовский и др.). Мы заметили, что близкие структуры наблюдались и в экспериментах с плёнками жидких кристаллов во вращающемся магнитном поле. Подобная геометрия соответствовала лёгкоплоскостным магнетикам и следовало ожидать что и в них возможно появление сложных доменных структур. Действительно, нам удалось показать, что формирование спиральных доменов и ведущих центров в таких магнетиках возможно в переменном магнитном поле, циркулярно поляризованном в лёгкой плоскости. Причем ядром спирального домена является топологический дефект типа Блоховской линии, а возникновение ведущих центров происходит в результате неустойчивости дипольных структур.

С 1996 г. в нашей лаборатории возникло новое направление исследований, связанное с авторезонансом в нелинейных волновых процессах. Это направление возникло совершенно случайно и связано со встречей с Лазаром Фридландом, профессором Иерусалимского университета. В то время он с небольшой группой коллег начал заниматься развитием приложения авторезонансного возбуждения колебаний в физике плазмы и нелинейной оптике. Их энтузиазм этой области оказался заразительным, и мы с головой окунулись в эту привлекательную и мало известную область исследований.

Нужно отметить, что проблема авторезонанса отнюдь не являлась чем то совершенно новым. Действительно, эта проблема впервые была поднята в работах В.И. Векслера и И.М. Мак Миллана ещё в 1944–45 гг. Именно на её основе были созданы и работают до сих пор ускорители элементарных частиц – синхротроны. Само название этих ускорителей отражает существо явления. Как было показано в дальнейшем (Чириков, 1956) эта задача непосредственно связана с динамикой нелинейного маятника с периодической возбуждающей силой, частота которой медленно меняется со временем. В силу нелинейности системы её частота зависит от амплитуды колебаний. Поэтому, чтобы возбудить колебания такого маятника до больших амплитуд необходимо менять частоту внешней силы так, чтобы она все время была близка к резонансной частоте осциллятора. Смысл идеи Векслера и Мак Миллана состоит в том что не нужно подстраивать частоту внешнего возмущения под резонансную частоту. Оказалось, что частоту внешнего возмущения можно менять линейно со временем, а сама система подстраивается под частоту внешнего поля. Происходит захват частицы внешним возмущением (фазо-

вая синхронизация). Разумеется, для этого необходимы определённые условия. Во-первых, нелинейность системы. В случае ускорителей частиц это релятивистская зависимость массы частицы от скорости. Во-вторых, амплитуда внешнего возмущения должна быть больше некоторого критического значения, определяемого скоростью изменения частоты возмущения. Именно это пороговое значение и является ключевым параметром теории. Наличие такого порога, собственно, и было указано ими.

Долгое время, однако, теория и находилась в этом состоянии.. Заслуга Л.Фридланда состоит в том, что они расширили круг задач и, тем самым, не только возобновили эту деятельность, но и вышли на новый уровень понимания явления авторезонанса не только с точки зрения приложения к новым физическим задачам, но и теоретического осмысления проблемы. Эта деятельность у нас попала на очень благодатную почву, поскольку наш большой опыт работы с нелинейными системами и обширные знания в области численных методов позволил выйти на новые исследования, связанные с теорией нелинейных волн и солитонов. Именно этим мы активно занимались, начиная с 1996 г.

Нужно отметить, что за прошедшее время к этой многообещающей тематике удалось привлечь ряд других групп как в России так и за рубежом (в частности, группу Л.Калякина из Института математики Уфимского отделения РАН и J.J.Rasmussen из RISOE National Lab, Denmark). Исследования активно продолжаются и в настоящее время, и, судя по литературе и цитированию, всё большее число исследователей начинают интересоваться этой проблематикой.

Из наиболее интересных задач, которые были решены нами к настоящему времени, следует отметить разработку методики авторезонансного возбуждения солитонов огибающих в рамках модели нелинейного уравнения Шредингера и солитонов в ряде других моделей, актуальных в современной теории нелинейных волн. Важным здесь является не только возбуждение солитонов с наперёд заданными параметрами (амплитуда и скорость) накачкой внешним полем с медленно меняющейся частотой, но и дальнейшее управление их динамикой. Эта тематика представляется актуальной для волн в магнетиках. Большой вклад в работу по этой тематике внёс к.ф.-м.н. С.В. Баталов (работает в ИФМ с 2006 г. сразу после окончания Уральского федерального университета).

Современные проблемы, которыми мы занимаемся в настоящее время и которые представляются наиболее актуальными как с теоретической, так и с прикладной точек зрения, связаны с распространением идеи авторезонанса на квантовые системы. В частности, возбуждение квантового осциллятора и переходы Ландау-Зинера. Удивительным является факт, что квантовые системы можно эффективно возбуждать с помощью эффекта авторезонанса, осуществлять контроль состояний и даже осуществ-

влять девозбуждение системы. Представляет особый интерес авторезонансный контроль конденсатов Бозе-Эйнштейна. Другая интересная проблема, которой активно занимаются в нашей лаборатории, совместно с рядом других лабораторий, – авторезонансное возбуждение солитонов спиновых волн, проблема имеет перспективы экспериментального исследования в магнитных плёнках. От нашей лаборатории С.В. Баталов является основным исполнителем по этой теме.

А.Б. Борисов, В.В. Киселев, А.Г. Шагалов

Список литературы

1. А.Б. Борисов, В.В. Киселев, *Нелинейные волны, солитоны и локализованные структуры в магнетиках, Т.1. Квазиодномерные магнитные солитоны*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2009), 512 с.
2. А.Б. Борисов, В.В. Киселев, *Нелинейные волны, солитоны и локализованные структуры в магнетиках, Т.2. Топологические солитоны, двумерные и трехмерные «узоры»*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2011), 416 с.
3. А.Б. Борисов, В.В. Киселев, *Квазиодномерные магнитные солитоны*, Физматлит. Москва (2014), 520 с.
4. А.Б. Борисов, *Начала нелинейной динамики*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2010), 356 с.
5. В.В. Киселев, Д.В. Долгих, *Нелинейно-упругие узоры из вмятин на поверхностях нагруженных пластин и оболочек*, Физматлит, Москва (2012), 164 с.
6. В.В. Киселев, *Квантовая макрофизика*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2010), 356 с.
7. А.Б. Борисов, В.В. Зверев, *Введение в регулярную и хаотическую динамику*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2014), 569 с.
8. A.B. Borisov, V.V. Zverev, *Nonlinear dynamics*, de Gruyter, Germany (2017), 283 p.

ОТДЕЛ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ

ЛАБОРАТОРИЯ

ОПТИКИ МЕТАЛЛОВ

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Анисимов Владимир Ильич, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н. профессор
- Гапонцев Владимир Витальевич, старший инженер
- Груздев Никита Борисович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Дьяченко Алексей Александрович, младший научный сотрудник
- Князев Юрий Валентинович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Кованова Ольга Михайловна, старший лаборант
- Коротин Данила Михайлович, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Коротин Дмитрий Михайлович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Кузьмин Юрий Иванович, научный сотрудник
- Лукоянов Алексей Владимирович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Махнев Александр Афонасьевич, научный сотрудник
- Новоселов Дмитрий Юрьевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Номерованная Лариса Викторовна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Поносков Юрий Сергеевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Потеряев Александр Иванович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Скорняков Сергей Львович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Соколов Виктор Иванович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Стрельцов Сергей Владимирович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор РАН
- Ушаков Алексей Вячеславович, младший научный сотрудник
- Шориков Алексей Олегович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Шредер Елена Ивановна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ ОПТИКИ МЕТАЛЛОВ

Первое сообщение о лаборатории оптики металлов имеется в «Положении об Институте металлофизики и металлургии Уральского филиала Академии наук СССР» за № 86 от 16 сентября 1943 г. Лаборатория была создана по инициативе Михаила Михайловича Носкова. М.М. Носков – выпускник Ленинградского Госуниверситета и один из авторов открытого в 1933 г. фотомагнитоэлектрического эффекта в полупроводниках (эффект Киикоина-Носкова). В 1936 г. в ЛФТИ М.М. Носков защитил кандидатскую диссертацию «Термоэлектрические и термомагнитные свойства полупроводников». Ещё в предвоенные годы он обнаружил своеобразное явление – увеличение магнитооптического эффекта Керра в ферромагнитных плёнках под влиянием диэлектрического покрытия [1] и намеревался продолжать исследования. Однако сумел это сделать, лишь вернувшись с фронта в июне 1945 г. Новые магнитооптические исследования были проведены на пластинах углеродистой стали, Ni и Fe, покрытых плёнками окиси железа, йодистого серебра и др. [2]. Теория этого явления предложена в 1942 г. Я.И. Френкелем [3]. Более общая теория периодической зависимости величины эффекта Керра от толщины и оптических постоянных n и k диэлектрического покрытия разработана М.М. Носковым совместно с А.В. Соколовым [4]. В 1950 г. М.М. Носков защищает докторскую диссертацию



Носков Михаил Михайлович



Скорняков Геннадий Павлович

и принимает в аспирантуру молодого сотрудника заводской лаборатории одного из заводов г. Свердловска Г.П. Скорнякова. После перевода М.М. Носкова в 1953 г. в Уральский госуниверситет кандидат физ.-мат. наук Геннадий Павлович Скорняков становится заведующим лабораторией оптики металлов (1953–1959 гг.). Существенное внимание в этот период уделяется практическим вопросам эмиссионного спектрального анализа, однако уже проводятся первые исследования оптических свойств благородных металлов (Cu, Au) и ферромагнитных сплавов.

В то время лаборатория размещалась в старом здании Института в трёх комнатах с антресолями и имела очень скудное оборудование, состоящее из напылительных установок, стилоскопа, двух монохроматоров для видимого диапазона спектра и оптического гониометра с пометкой ГОИ (привезен из Ленинграда).

В 1956 г. в лаборатории работали Т.П. Чукина, К.А. Ефремова, И.И. Сасовская и В.Ф. Плохих.

В 1959 г. руководителем лаборатории становится Анатолий Вячеславович Соколов, физик-теоретик, занимавшийся вопросами квантовой теории оптических и магнитооптических явлений в металлах. В начале 1959 г. он защитил докторскую диссертацию «Оптические свойства металлов». В 1961 г. под тем же названием опубликована его монография, переизданная в Англии и получившая широкую известность [5].



На фото 1959 г. – четверо заведующих лабораторией разных лет. В первом ряду слева – М.М. Носков, М.М. Кириллова, А.В. Соколов, справа вверху – Г.П. Скорняков

В эти годы лаборатория пополнилась новыми кадрами. Пришли Г.А. Болотин, В.М. Маевский, М.М. Кириллова, позднее – Л.В. Номерованная, Ю.В. Князев, А.В. Дружинин. Оживление металлооптических исследований, начавшееся в 50-е годы, привело к появлению ряда новых методов определения оптических постоянных металла (метод Кравца, метод «пересекающихся окружностей», метод вращающихся поляризаторов и др.). Однако эти методы были неудобны в пользовании и не обеспечивали достаточной точности измеряемых величин. И.И. Сасовская и М.М. Кириллова остановили свой выбор на «бескомпенсаторном» эллипсометрическом методе Битти [6]. На базе монохроматора и гониометра ГОИ была создана первая эллипсометрическая установка для измерения оптических характеристик металлов в видимой и УФ областях спектра. Метод Битти до сих пор считается лучшим и используется в лаборатории и других оптических группах.

В 1959 г. в институт вернулся М.М. Носков. Вместе с ним из Уральского Госуниверситета в лабораторию пришел Б.А. Чариков. Ставится новая задача – создать установку для оптических измерений металлов методом Битти в ИК-области спектра. Лаборатория к тому времени уже имела ИК-спектрометры и приёмники ИК-излучения. Решалась проблема с поляризаторами света. В достаточно короткие сроки установка была создана. В 1962 г. опубликована первая работа по исследованию оптических свойств и электронных характеристик переходных d-металлов (Ti, V) с авторским составом: Г.А. Болотин, А.Н. Волошинский, М.М. Кириллова, М.М. Носков, А.В. Соколов, Б.А. Чариков. Анатолий Вячеславович докладывал эту работу на Научном собрании института. С возвращением М.М. Носкова в лабораторию снова начинаются магнитооптические исследования. Создаётся установка для измерения полярного эффекта Керра в ИК-области спектра.

Следует отметить большой вклад Б.А. Чарикова в становление методической базы лаборатории в тот период. Борис Александрович был талантливым экспериментатором, способным нестандартно решать самые сложные методические задачи. При его непосредственном участии выполнены первые исследования оптических свойств 3d-металлов в ИК-области. Ему принадлежит заслуга создания установки для измерения полярного эффекта Керра в ИК-области и обнаружение магнитооптического резонанса в висмуте. Б.А. Чариков трагически погиб в феврале 1969 г. А ещё раньше, в июне 1964 г., скончался профессор А.В. Соколов. Их преждевременный уход стал большой потерей для коллек-



Соколов Анатолий Вячеславович



Кириллова Маргарита Михайловна



Чариков Борис Александрович

тива сотрудников. Михаил Михайлович Носков снова возглавил лабораторию (1964–1978 гг.). В дальнейшем (1978–2000 гг.) руководство лабораторией осуществляла Маргарита Михайловна Кириллова (докторская диссертация (1984 г.), профессор (1999 г.)).

В 60-е годы стремительными темпами начинают развиваться первопринципные расчёты электронной структуры и физических свойств твёрдых тел. Изучение электронного строения металлов становится одной из центральных задач физики твёрдого тела. Измерение оптических спектров поглощения металлов, иначе говоря, частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon(\omega)$, становится одним из основных экспериментальных способов изучения их электронной структуры. Состояние металлооптики к 1955 г. проанализировали В.Л. Гинзбург и Г.П. Мотулевич [7]. В предшествующий период достаточно подробно были исследованы оптические свойства благородных металлов (Cu, Ag, Au) в видимом диапазоне спектра. Что касается переходных металлов, то успехи в их изучении были невелики. Исследование оптических свойств и электронной структуры переходных d- и f- металлов становится основным научным направлением в тематике лаборатории. В последующие годы были выполнены исследования частотной зависимости $\epsilon(\omega)$ полных серий 3d (Sc, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni), 4d (Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd) и 5d (Ta, W, Re, Os, Ir, Pt)-переходных металлов (М.М. Кириллова, Л.В. Номерованная, М.М. Носков, Г.А. Болотин), а также редкоземельных металлов (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb) (Ю.В. Князев,



1959 г. Сидят: И.И. Сасовская, Т.П. Чукина, З.А. Зайцева;
стоят: А.В. Соколов, М.М. Кириллова, В.Ф. Плохих, Г.П. Скорняков



М.М. Носков (справа) и В.Ф. Плохих собирают оптическую установку

М.М. Носков, Г.А. Болотин). Для всего класса d- и f- металлов были определены значения плазменной ω_p и релаксационной γ частот электронов проводимости. На базе первопринципных расчётов диэлектрической проницаемости установлены закономерности формирования оптических свойств металлов, определены энергии обменного и спин-орбитального расщепления энергетических зон. Обнаружены оптические резонансы, связанные с перестройкой электронного спектра в d- и f- металлах и их сплавах при магнитных фазовых превращениях различного типа [8, 9]. Расчёты межзонной оптической проводимости V, Cr, Fe, Rh, Ir, Pt выполнены В.П. Широковским, В.Г. Топольским, В.Г. Ганиным, Н.А. Шилковой

методом функций Грина [10]; расчёты оптических спектров поглощения Re, Ru, Os, Tc выполнены В.Н. Антоновым, Вл.Н. Антоновым и Е.Е. Красовским (Институт металлофизики академии наук УССР, г. Киев) релятивистским LМТО методом [11].

Экспериментально наблюдаемое низкоэнергетическое (десять доли эВ) оптическое поглощение в магнитоупорядоченных (ФМ и АФМ) тяжёлых редкоземельных металлах было объяснено на основе расчётов их электронной структуры, выполненных Л.М. Сандрацким [12]. В расчётах показано, что в результате обменного взаимодействия 4f-электронов с электронами проводимости в зонных спектрах этих металлов возникают новые (т.н. «магнитные») энергетические щели, ширина которых соответствует энергиям локализации экспериментальных пиков поглощения. Межзонные переходы через такие щели приводят к аномалиям оптических характеристик. Впервые полученные эллипсометрическим методом оптические константы d- и f- металлов включены в справочное издание Ландольта-Бернштейна [13].

Начинаются первые защиты кандидатских диссертаций: Л.А. Афанасьева (1967 г.), М.М. Кириллова (1968 г.), Г.А. Болотин (1968 г.), И.И. Сасовская (1972 г.), Л.В. Номерованная (1973 г.), Н.М. Волошинская (1975 г.). В лабораторию приходят новые сотрудники: И.Д. Лобов, А.Б. Шайкин, А.А. Махнев. Создаются новые измерительные установки.

В 1970–73 гг. Г.А. Болотиным и В.М. Маевским выполнен цикл работ, в которых была развита последовательная феноменологическая теория магнитооптических эффектов для изотропных ферромагнетиков с учётом слабой пространственной дисперсии [14,



После защиты докторской диссертации М.М. Кирилловой, 1984 г.

15]. В теории впервые учитывалось влияние на магнитооптические эффекты продольных волн, возбуждаемых светом в ферромагнитной среде. Были предсказаны новые нечётные по намагниченности экваториальные эффекты изменения интенсивности прошедшего через ферромагнитную плёнку света при р- и s- поляризациях падающей волны: giroэлектрический \bar{d}_p -эффект, пропорциональный недиагональной компоненте ϵ_{xy} тензора диэлектрической проницаемости ϵ и гиромагнитный \bar{d}_s -эффект, который определяется исключительно недиагональной компонентой μ_{xy} тензора магнитной проницаемости μ . Эффекты экспериментально обнаружены и изучены А.В. Дружининым и И.Д. Лобовым с помощью специально созданных высокочувствительных методик. Исследования проведены на плёнках Fe, Co, Ni. Из измерений угловой зависимости \bar{d}_s -эффекта в прошедшем свете определены значения $\text{Re}(\mu_{xy})$ и $\text{Im}(\mu_{xy})$ плёнок Fe и Ni [16]. Таким образом, впервые в оптическом диапазоне частот (10^{14} – 10^{15} с⁻¹) обнаружены и изучены гиромагнитные свойства Fe, Co, Ni, связанные с отличием от нуля тензора магнитной проницаемости μ . Предложен микроскопический механизм возникновения магнитной проницаемости в ферромагнитных металлах на оптических частотах [17].

Как отмечалось выше, для многих d-металлов теоретические (первопринципные) вычисления частотной дисперсии оптической проводимости $\sigma(\omega)$ в ближнем спектральном диапазоне энергий ($E \leq 5$ эВ) привели к удовлетворительному согласию с экспериментом. Значительно меньший прогресс был достигнут в интерпретации оптических свойств металлов в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) ($E = 5$ – 40 эВ). Дисперсионные кривые $E(k)$, расположенные высоко над уровнем Ферми E_F , нуждались в существенной коррекции путём сопоставления расчётных данных с оптическими и фотоэмиссионными спектрами. В связи с этим оптические измерения в ВУФ-области становились столь же необходимыми, как и в традиционном оптическом диапазоне энергий $E = 0,05$ – 5 эВ. Такая возможность предоставилась в 1982 г. Инициатором измерений отражательной способности R-металлов с использованием синхротронного излучения от электронного накопительного кольца ВЭПП-2М ($E = 500$ МэВ) в Институте ядерной физики СО АН СССР (г. Новосибирск) выступил А.В. Дружинин. Итог его поездки – спектры отражения Gd, Dy, Re, Mo, Ru и Os на участке энергий фотона $E = 5$ – 43 эВ [18]. Частотные зависимости оптической проводимости, диэлектрической проницаемости $\epsilon(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega)$ и функции характеристических потерь энергии электронов были рассчитаны с использованием соотношения Крамерса-Кронига.

А.Б. Шайкиным была разработана и аппаратно реализована автоматизированная установка для измерения спектров пьезоотражения, в которых регистрируется относительное приращение отражательной способности $\Delta R/R$ металла под действием одноо-

сных упругих напряжений. Впервые изучены спектры пьезоотражения монокристаллов с ОЦК-решёткой (V, Cr, Mo, W). Рассчитаны дисперсионные зависимости изменения оптической проводимости σ при объёмной ($\Delta\sigma_1$), тетрагональной ($\Delta\sigma_2$) и тригональной ($\Delta\sigma_3$) деформации, восстановлен вид полного упругооптического тензора этих металлов в области интенсивного межзонного поглощения световой волны. Получены количественные оценки объёмного и тетрагонального деформационных потенциалов энергетических зон d-типа в Δ - и G- направлениях зоны Бриллюэна для Mo и W. [19, 20]. Проведённое исследование показало, что изучение дисперсионной зависимости компонент упруго-оптического тензора является эффективным методом анализа тонкой структуры межзонного поглощения и локальных участков энергетического спектра электронов переходных металлов.

С 1978 г. в лаборатории Юрий Сергеевич Поносов организовал и возглавил исследования комбинационного (КРС или Рамановского) рассеяния света. Метод с его высоким энергетическим и импульсным разрешением позволяет исследовать возбуждения в области малых ($q \sim 10^6 \text{ см}^{-1}$) волновых векторов. Использование сверхчистых монокристаллов с большой длиной свободного пробега l обеспечивает режим сохранения волнового вектора $q \ll 1/l$, что позволяет наблюдать спектры электронных и фононных возбуждений, исследовать их дисперсию и взаимодействие. Впервые методом КРС были исследованы анизотропия температурных зависимостей оптических фононов в ГПУ-переходных металлах (Re, Ru, Os, Tc, Ti, Zr, Y, Hf), в сплавах Re-W, Re-Mo. Обнаружена существенная дисперсия оптических ветвей вблизи центра зоны Бриллюэна, пороги затухания Ландау в ширинах линий, а также связанные с колебаниями решётки и обладающие пространственной дисперсией электронные возбуждения со значительной температурной зависимостью. Получены свидетельства о существовании низкотемпературных сверхструктур в Re [21]. Ряд фазовых переходов (Ti, TiNi, FeSi, PbS) изучен при изменении температуры и давления, приложение которого позволяет оценить коэффициенты Грюнайзена и в ряде случаев помогает в идентификации механизма фононных сдвигов. Эксперименты под давлением проведены совместно с группой высоких давлений ОРАР ИФМ, а также с ведущими группами мира (Институт физики твёрдых тел им. М. Планка, Штутгарт, Геофизическая лаборатория, Вашингтон).

Долгие годы в лаборатории работала И.И. Сасовская. Объектами её оптических исследований были сплавы и соединения переходных и благородных металлов, в том числе испытывающие магнитные или структурные превращения (Ti-Fe, Ni-Al, Fe-Rh и др.). На основе оптических данных проверялись модели, используемые для описания электронной структуры сплавов, например, модель жёсткой полосы. В сплавах титана с ванадием и ниобием обнаружены аномалии оптических свойств в предпереходной (перед



Магнитооптики – А.В. Дружинин, В.М. Маевский, И.Д. Лобов

фазовым β - ω -превращением) области, вызванные неустойчивым состоянием решётки β -фазы. Однако ввиду отрицательного температурного коэффициента электросопротивления сплавов авторы допускали формирование псевдощели на уровне Ферми.

И.И. Сасовской исследованы также оптические свойства эквиатомного сплава TiNi с эффектом памяти формы. Установлено, что мартенситное превращение B2-B19' приводит к значительному изменению низкоэнергетической части оптического спектра поглощения, что указывает на модификацию электронного энергетического спектра в окрестности уровня Ферми. Такая перестройка приписывается формированию в B19'-фазе энергетической щели, обусловленной расщеплением вырожденных d-состояний. Наблюдаемые изменения зонного спектра показали важную роль электронного фактора в инициировании мартенситного превращения [22]. Исследования выполнены с участием сотрудников Сибирского физико-технического НИИ Томского госуниверситета С.А. Шабаловской и А.И. Лоткова.

А.П. Владимиров пришел в лабораторию в 1983 г. как специалист по голографии и лазерной интерферометрии. Впервые показал возможность использования динамики лазерных спеклов для количественных измерений пластической деформации и для анализа повреждений конструкционных материалов. А.П. Владимировым разработан когерентно-оптический метод неразрушающего контроля изделий, позволяющий обнаруживать начало микро- и макроскопических повреждений конструкционных изделий. Получено авторское свидетельство «Способ управления процессом упрочнения деталей поверхностным пластическим деформи-

рованием» [23] на повышение качества контроля. После защиты кандидатской диссертации «Динамика спеклов в плоскости изображения пластически деформируемого объекта» (г. Ленинград, 1989 г.) Александр Петрович перешёл в Институт машиноведения УрО РАН, ныне – доктор технических наук.

В следующие десятилетия (1980–2000 гг.) объектами исследований становятся высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), неупорядоченные сплавы переходных металлов, интерметаллические соединения и сплавы Гейслера. Оптические, кинетические и магнитные свойства этих материалов изучали во взаимосвязи с электронной структурой, как правило, с участием сотрудников других лабораторий института. Большой вклад в изучение электронной структуры ВТСП, сплавов и интерметаллических соединений внесла Лариса Викторовна Номерованная. Отметим некоторые результаты, полученные в этот период.

Исследована анизотропия оптических свойств объёмных не двойниковых монокристаллов семейств $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ при изменении содержания кислорода, катионном замещении и при разупорядочении облучением быстрыми нейтронами [24]. Определены основные параметры электронной структуры: энергии пиков межзонного поглощения, плазменные частоты и концентрации носителей заряда. Получены оценки эффективной массы носителей заряда. Методом КРС установлено, что вблизи температуры Нееля T_N локальная симметрия тетрагонального $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,1}$ понижается до орторомбической вследствие появления фрагментов цепочек $\text{Cu}-\text{O}_{4'}$, $\text{O}_{5'}$, и его электронная структура приобретает черты, сходные со структурой сверхпроводящих составов [25]. На основе зонного спектра с полупроводниковой щелью, рассчитанного в приближении атомных сфер ЛМТО методом с поправкой к потенциалу незанятых состояний, проведена интерпретация структур в оптическом спектре поглощения тетрагональных кристаллов $\text{Y}-\text{Ba}-\text{Cu}-\text{O}$ [26].

Изучено влияние структурных дефектов (вакансий и антиструктурных атомов) на оптические свойства и электронную структуру соединений MeT ($\text{Me}=\text{Co}, \text{Mn}$; $\text{T}=\text{Ga}, \text{Al}$). Обнаружено усиление низкоэнергетического поглощения с увеличением концентрации Co , Mn и появление новых особенностей в оптических спектрах, свидетельствующих о перестройке электронных состояний вблизи уровня Ферми с увеличением концентрации дефектов. Теоретически показано, что оптические спектры можно объяснить при учёте дефектов структуры, которые приводят к появлению дополнительных электронных состояний d- и (s-p)-симметрии ниже E_F как в случае примеси, так и вакансии [27]. В сплавах $\text{Cr}_{100-x}\text{Al}_x$ обнаружены аномалии оптических свойств в ИК области спектра, свидетельствующие о диэлектризации электронной системы. Наиболее ярко этот эффект наблюдается в области концентраций, где имеет место отрицательный температурный коэффициент электросо-

противления. Показано, что аномалии оптических и электрических свойств вызваны локализацией свободных носителей вблизи уровня Ферми [28].

В начале 90-х гг. Е.И. Шредер приступила к изучению электронного строения и физических свойств новых для института объектов – сплавов Гейслера, магнитных интерметаллических соединений X_2MeZ со структурой L2_1 и XMnZ со структурой C1_b (X, Me – переходный или благородный металл, Z – элемент III-V группы). Некоторые из сплавов Гейслера, согласно зонным расчётам, можно отнести к полуметаллическим ферромагнетикам (ПМФ) – материалам, в зонном спектре которых имеется полупроводниковая щель для одной из спиновых подсистем. Ожидаемая возможность 100%-ной спиновой поляризации электронов проводимости делает ПМФ перспективными материалами для использования в спиновой электронике. Е.И. Шредер выполнено систематическое исследование спектральных характеристик и электронных параметров нескольких групп сплавов Гейслера. Изучена модификация спектральных характеристик и электронных параметров при варьировании состава во взаимосвязи с изменениями электронной структуры. Особую группу составляют сплавы, где $\text{Me}=\text{Mn}$. Для них была установлена корреляция между эффективной концентрацией электронов проводимости $N_{\text{эф}}$ и температурой Кюри T_C , подтверждая важную роль электронов проводимости в установлении магнитного порядка в сплавах и формировании большого (3–4 μ_B) локального магнитного момента на атомах Mn при косвенном обменном взаимодействии. В некоторых сплавах (например, Co_2MnZ ($\text{Z}=\text{Al}, \text{Ga}, \text{Si}$), Fe_2MeAl ($\text{Me}=\text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}$)) обнаружено аномальное поведение оптических свойств – снижение или отсутствие вклада от внутризонного поглощения в средней ИК-области спектра. Первопринципные расчёты электронной структуры показали, что именно эти сплавы можно отнести к ПМФ. Таким образом, аномалию оптических свойств можно считать проявлением энергетической щели на уровне Ферми в оптических спектрах [29, 30].

Виктор Иванович Соколов (докторская диссертация 1988 г., г. Ленинград) пришёл в лабораторию оптики металлов в 1993 г. Основное направление деятельности – исследование экситонов в полупроводниках различными спектральными методами. Были выявлены состояния примесных экситонов донорного и акцепторного типа в ряде соединений AII-BVI с примесями переходных металлов 3d-типа, в частности, ZnSe:Ni ; ZnO:Ni с использованием метода электропоглощения. Н.Б. Груздев пришёл в лабораторию оптики металлов в 1999 г. В 2013 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Электронные и колебательные состояния, индуцированные примесями 3d-металлов в нанопорошках и тонких плёнках оксида и халькогенидов цинка», выполненную под руководством В.И. Соколова. Были выявлены примесные экситоны в монокристаллах ZnTe:Ni (акцепторный экситон); ZnO:Co (донорный

экситон), а также экситоны Ванье-Мотта в нанопорошках Cu_2O ; ZnO ; ZnO:Mn . Работа по наблюдению экситонов Ванье-Мотта в тонких слоях ZnO:Mn выполнена совместно с сотрудниками Института физики Чешской академии наук (Прага). В.И. Соколов и Н.Б. Груздев совместно с сотрудниками УрФУ (В.А. Пустоваровым, В.Ю. Ивановым, А.С. Москвиным, В.Н. Чурмановым) активно исследовали фотолюминесценцию в оксидных системах $\text{Ni}_c\text{Mg}_{1-c}\text{O}$, $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$, в том числе, возбуждаемую синхротронным излучением. Это позволило впервые для оксидных соединений наблюдать экситоны с (p-d)-переносом заряда.

В 1993 г. в лабораторию оптики металлов из лаборатории полупроводников и полуметаллов перешла Татьяна Петровна Суркова – специалист в области оптической спектроскопии широкозонных полупроводников и твёрдых растворов на их основе, легированных примесями 3d-переходных металлов. Её научная работа была связана с изучением особенностей поведения данных примесей, позволивших использовать их для определения таких фундаментальных характеристик полупроводниковых твёрдых растворов и гетероструктур, как сдвиг энергетических зон, структурное и композиционное разупорядочение. Стипендиат Немецкого общества академических обменов (DAAD, 1996 г.) и Королевского общества Великобритании (1998, 1999, 2000 г.г.), координатор темы по исследованию оптических свойств широкозонных полупроводниковых структур, легированных примесями переходных элементов, в рамках Соглашения о сотрудничестве между РАН и Польской Академией наук (с 1996 г.), руководитель



Ю.В. Князев и Ю.И. Кузьмин около сверхвысоковакуумной установки

проектов РФФИ и РФФИ-Урал, она привнесла в лабораторию новые международные связи. Особенно активное многолетнее сотрудничество было с Институтом физики Польской Академии наук (г. Варшава). В рамках этого сотрудничества проф. Марек Годлевский с коллегами посещали лабораторию, а М.М. Кириллова – Институт физики ПАН.

В 1981–89 гг. по заданию Государственного института прикладной оптики (г. Казань) и распоряжению директивных органов лабораторией выполнены крупное теоретическое и экспериментальное исследование по теме «Поляризационные характеристики собственного излучения конструкционных материалов и объектов сложной геометрической формы». В работе приняли участие М.М. Кириллова (рук.), Г.А. Болотин, В.М. Маевский, А.А. Махнев, А.В. Дружинин, Ю.В. Князев. Результаты имели целевое техническое назначение. Тематика получила одобрение Президента АН СССР академика А.П. Александрова при посещении лаборатории во время его пребывания в Институте физики металлов (1982 г.). С результатами работ был ознакомлен также академик С.М. Прохоров, посетивший г. Свердловск для участия в выездной сессии Президиума АН СССР (1987 г.).

Финансовые поступления по этой теме оказались весьма значительными и позволили улучшить материальную базу лаборатории. Были закуплены новые спектральные комплексы (КСВУ), оптические криостаты, а также сверхвысоковакуумная ($P \sim 10^{-9}$ Па) установка УСУ-4 для проведения эллипсометрических измерений в широком интервале температур. Были получены также дополнительные ставки.

Эллипсометрическая установка на базе УСУ-4 и спектрально-вычислительного комплекса КСВУ была создана Ю.В. Князевым и Ю.И. Кузьминым. Спектральный интервал составлял 0,35–2 мкм, температурный интервал 295–1220 К. Перечислим результаты, полученные на установке в условиях сверхвысокого вакуума ($P \sim 10^{-9}$ Па).

1. Изучена температурная зависимость оптических характеристик монокристалла Fe. Обнаружены изменения в оптическом поглощении с ростом температуры, включающем переход через температуру Кюри T_c ($0,28 \leq T/T_c \leq 1,17$). Наблюдаемая на опыте тенденция температурного изменения оптической проводимости $\sigma(\omega)$ получила удовлетворительное объяснение в рамках модели электронной структуры, учитывающей влияние спинового разупорядочения на электронную плотность состояний [31]. В качестве основного физического эффекта рассмотрен эффект гибридизации электронных состояний с противоположными спиновыми проекциями, возрастающий с увеличением угла между магнитными моментами соседних атомов [32].

2. Впервые изучены оптические свойства лёгких редкоземельных металлов (La, Ce, Pr, Nd) и структурный $\gamma \rightarrow \alpha$ -фазовый переход в церию. Показано, что спектр оптической проводимости $\sigma(\omega)$ це-

рия в γ - и α -фазах кардинально отличается от соответствующих зависимостей для La, Pr и Nd тем, что основная полоса межзонного поглощения смещена к низким энергиям. Оптические данные указывают на уширение 4f-полос и их сдвиг вверх от уровня Ферми и подтверждают модель $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехода, основанную на делокализации 4f-зоны [33].

3. Изучены оптические свойства сплавов Гейслера Ni_2MnSn и Pd_2MnSn в области спектра $E=0,5-5,2$ эВ при температурах $T=77-660$ К, включающих переход через температуру Кюри T_C . Аномальное поведение оптических спектров исследуемых объектов при $T > T_C$ состоит в формировании дополнительных особенностей и локальном усилении межзонного поглощения. Таким образом, перестройка энергетического спектра электронов, связанная с магнитным разупорядочением сплавов, начинается при температурах $T/T_C \geq 1,4$ (Ni_2MnSn) и $T/T_C \geq 2,38$ (Pd_2MnSn) и имеет локальный характер [34]. Результат получил объяснение в рамках теории П.П. Гулецкого и Л.М. Сандрацкого [31].

В 1993 г. в рамках проектов РФФИ, «Украина-Россия» и др. лаборатория оптики металлов совместно с лабораторией электрических явлений и при участии Ф.А. Пудонина (Физический институт РАН, г. Москва) приступили к исследованию оптических, магнитооптических, магнитных и структурных характеристик металлических сверхрешёток и слоёвых наноструктур «металл-полупроводник». Была разработана теория нечётных магнитооптических эффектов в многослойных структурах с произвольной ориентацией намагниченности и предложен метод определения типа магнитного упорядочения в металлических сверхрешётках, основанный на измерении экваториального эффекта Керра. Обнаружены эффекты размерного квантования в оптических и магнитооптических свойствах структур Fe/Cu, Fe/Cr, Nb/Cu, коррелирующие с топологией поверхности Ферми контактирующих металлов. Впервые измерен магниторефрактивный эффект на сверхрешётках Fe/Cr в ИК-области. В гетероструктурах Fe/GaAs/Fe и Fe/ZnTe/Fe обнаружено межслоевое обменное взаимодействие АФМ типа (Г.А. Болотин, В.М. Маевский, И.Д. Лобов, М.М. Кириллова, Л.В. Номерованная, А.А. Махнев, Ф.А. Пудонин, В.В. Устинов, Л.Н. Ромашев, А.В. Королев). И.Д. Лобовым защищена кандидатская диссертация «Магнитооптика сверхрешёток Fe/X (X=Cr, Cu, Al)» (2000 г.).

В последующие годы в сверхрешётках Fe/Cr и Co/Cu, обладающих гигантским магниторезистивным эффектом (ГМР), на ИК-частотах изучен магниторефрактивный эффект, являющийся высокочастотным (оптическим) аналогом ГМР. На основе измерения ИК-спектров магнитоотражения разработан способ определения параметров интерфейсного рассеяния спинзависящих электронов проводимости в слоистых структурах [35]. Впервые в сверхрешётках Fe/Cr и Co/Cu изучена их эволюция при

переходе от антиферромагнитного к неколлинеарному и ферромагнитному типам межслоевого обменного взаимодействия. Полученные результаты необходимы при разработке функциональных устройств спинтроники на основе магнитных металлических наноструктур с ГМР-эффектом (И.Д. Лобов, М.М. Кириллова, Л.Н. Ромашев, М.А. Миляев, В.В. Устинов)

В 2000 г. лабораторию возглавил Анисимов Владимир Ильич, доктор физико-математических наук (1990), известный специалист в области численных расчётов электронной структуры сильно коррелированных соединений, автор 4-х монографий, включая обзор «Electronic Structure of Strongly Correlated Materials», написанный совместно с академиком Юрием Александровичем Изюмовым, изданный в 2010 г. издательством Springer.

Важным вкладом В.И. Анисимова в развитие современных теоретических методов исследования электронной структуры и соединений является разработка метода LDA+U для расчёта из «первых принципов» электронной структуры материалов с сильными электронными корреляциями [36], разработка и совершенствование метода LDA+DMFT, являющегося объединением теории функционала плотности и теории динамического среднего поля [37]. За развитие вычислительных методов В.И. Анисимов был удостоен премии Александра фон Гумбольдта (Германия, 2001 г.), премии УрО РАН имени И.М. Цицильковского (2012 г.).

Вместе с В.И. Анисимовым в лабораторию пришли его ученики и коллеги М.А. Коротин, А.И. Потеряев, И.А. Некрасов, А.О. Шориков. Это позволило создать новое теоретическое направление, которое успешно развивается и по сей день. Студентами пришли в лабораторию С.В. Стрельцов, А.В. Лукоянов, С.Л. Скорняков, Д.М. Коротин, Д.Ю. Новоселов, Д.М. Коротин, защитили дипломные работы, затем кандидатские диссертации.

В современной науке компьютерное моделирование физических свойств сложных соединений является необходимым элементом технологии дизайна новых перспективных материалов для последующих практических применений в современной промышленности. Поскольку число возможных вариантов состава многокомпонентных систем в общем случае настолько велико, то слепой поиск материалов с требуемыми свойствами может оказаться запретительно дорогим и долгим. Возможность быстро и относительно дешево провести перебор возможных соединений методом компьютерного моделирования является единственным способом решения этой проблемы. Данный подход позволяет сократить дорогостоящие и длительные экспериментальные исследования и значительно уменьшить количество химических соединений, которые необходимо синтезировать и аттестовать для получения нужных физических характеристик.



Анисимов Владимир Ильич

Исследование электронных свойств реальных твёрдых тел в рамках первопринципных расчётов началось более пятидесяти лет назад. В зонных расчётах в рамках теории функционала плотности такие виды взаимодействия, как межъядерные, электронно-ядерные и, частично, электрон-электронные, учитываются строго. Исключением являются электрон-электронные корреляции, которые рассматриваются как для однородного невзаимодействующего электронного газа в рамках приближения локальной плотности (LDA) или его расширений. Когда электрон-электронные взаимодействия становятся настолько сильными, что электронные состояния теряют сходство с невзаимодействующим электронным газом, то можно говорить о «сильных электрон-электронных корреляциях». Сильные корреляции подразумевают частичную пространственную и энергетическую локализацию электронных состояний.

Сотрудниками лаборатории оптики металлов под руководством В.И. Анисимова были предложены и реализованы в компьютерных кодах современные методы теоретического исследования электронных свойств сильно коррелированных систем. Это такие методы, как LDA+U [36] (приближение локальной плотности с явным учётом корреляционных эффектов в рамках модели Хаббарда), LDA+DMFT [37] (комбинированный метод приближения локальной плотности и теории динамического среднего поля), LDA+U+SO [38] (метод, учитывающий в полной матричной форме как сильные электронные корреляции, так и спин-орбитальное взаимодействие 5f-электронов), и другие.

В настоящее время эти методы широко применяются для расчёта электронной структуры, спектральных и магнитных свойств раз-



Группа теоретиков

личных классов соединений и сложных систем. Использование этих методов позволило корректно описать многие физические свойства магнитных [39, 40], сверхпроводящих [41], низкоразмерных материалов и систем [42], а также предсказать изменения их физических свойств в зависимости от давления и температуры [43, 44].

Применение методов первопринципного исследования сильно коррелированных систем, а также учёта дефектов и других особенностей материалов, возникающих в процессе облучения, позволило выполнить ряд работ совместно с сотрудниками Федерального государственного унитарного предприятия «РФЯЦ – ВНИИТФ имени академика Е.И. Забабахина» (г. Снежинск). Проведены исследования по прогнозированию поведения при облучении таких ядерно-активных материалов, как металлический плутоний, его сплавы и соединения и трансплутониевые металлы [45]. Подход прошел апробацию на примере плутония и его сплавов с галлием и позволил сократить количество проводимых дорогостоящих и опасных экспериментов с делящимися материалами.

С 2000 г. под руководством В.И. Анисимова в лаборатории были реализованы 10 инициативных и международных проектов Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), программ Уральского отделения и Президиума РАН.

С 2014 г. в лаборатории реализуется масштабный проект Российского научного фонда (РНФ 14-22-00004) по проведению фундаментальных и поисковых научных исследований под руководством В.И. Анисимова. Разработанные методики (DFT+U метод в базе функций Ванье; DFT+DMFT) реализованы в виде компьютерных программ и объединены в единую структуру под названием AMULET – Advanced Materials simUlation Ekaterinburg’s Toolbox – Екатеринбургский набор инструментов для моделирования современных материалов. Благодаря поддержке РНФ, в лаборатории закуплено новое мощное вычислительное оборудование – расчётный кластер, состоящий из 28 узлов с общим числом потоков 840 и ёмкостью дискового пространства 6 Тб.

В ходе работы по проекту РНФ разработана методика вычисления фоновых частот в сильно коррелированных материалах с использованием результатов расчёта электронной структуры DFT+U методом в базе функций Ванье. Реализован в виде компьютерного кода DFT+DMFT+SO метод для расчёта электронной структуры сильнокоррелированных соединений с учётом спин-орбитального взаимодействия в базе функций Ванье. Разработан и реализован в виде компьютерного кода метод вычисления электронной энтропии, основанный на различных физических подходах. Это позволяет вычислять не только полную энергию материалов с сильными электронными корреляциями в методе DFT+DMFT, но также и свободную энергию, которая определяет фазовые переходы. Разработан метод расчёта электронной структуры и магнитных свойств сплавов и твёрдых растворов для сильно



На международной школе-конференции, Триест, Италия, 2005 г.

коррелированных веществ, основанный на объединении теории динамического среднего поля и приближения когерентного потенциала. Метод применён к проблеме структурного $\gamma \rightarrow \epsilon$ -перехода для сплава железо–марганец [46]. Метод вычисления обменных параметров модели Гейзенберга, основанный на использовании функций Грина, в рамках методов DFT+U и DFT+DMFT, реализован в виде компьютерного кода и протестирован на примере соединений NiO, FeO, Li_2MnO_3 и KCuF_3 [47]. На основе квантового метода Монте-Карло с непрерывным временем разработан новый способ решения эффективной примесной задачи, появляющейся в теории динамического среднего поля. В данном методе используется вращательно инвариантный вид оператора Кулоновского взаимодействия. Выполнены совместные теоретические и экспериментальные исследования электронной структуры, спектральных и магнитных свойств: монослоя графена, двойного слоя графена, графита [48].

За последний годы активно проходила совместная научная работа заведующего и сотрудников лаборатории оптики металлов с коллегами из ведущих научных центров мира, в том числе: Аугсбургский университет, г. Аугсбург, Германия, Институт Карнеги, г. Вашингтон, США, Институт Макса Планка, г. Штутгарт, Германия, Институт физики твёрдого тела, г. Минск, Белоруссия, Калифорнийский университет, г. Дэвис, Калифорния, США, Кёльнский университет, г. Кёльн, Германия, Международная школа высшего образования, г. Триест, Италия, Токийский университет, г. Токио, Япония, Университеты гг. Гронингена и Наймегена, Нидерланды, Университет Пьера и Марии Кюри, г. Париж, Франция, Университет Рутгера, г. Пискэйтэвэй, Нью-Джерси, США, Федеральный технический институт, г. Цюрих, Швейцария, и многих других. В.И. Анисимов неоднократно являлся организатором (ди-

ректором) международных школ-конференций: «Correlation Effects in Electronic Structure Calculations» в 2000 г. и в 2002 г. в Международном центре теоретической физики, Триест, Италия, «Dynamical Mean-Field theory for Correlated electrons» в 2005 г., Триест, Италия, «Correlation effects in electronic structure calculations» в 2001 г. в центре им. Лоренца, Лейден, Нидерланды.

Успешное развитие в лаборатории оптики металлов теоретического направления по расчёту электронной структуры реальных соединений сразу повлекло за собой большой объём совместных с экспериментаторами исследований перспективных материалов. В работе Ю.В. Князева, Ю.И. Кузьмина и А.В. Лукоянова для многих классов интерметаллических соединений редкоземельных и d-металлов (RNi_5 , RRhGe , R_2Fe_{17} и других) проведены исследования оптических свойств в рамках эллипсометрического метода и электронной структуры при помощи первопринципного подхода с учётом электронных корреляций [49]. В результате получена детальная информация об оптической проводимости и вкладах различных типов межзонных переходов в нее.

В работе Ю.С. Поносова и С.В. Стрельцова на основе первопринципных расчётов электронной структуры с использованием формализма Е.Г. Максимова смоделированы частотные зависимости спектров электронного рассеяния света и собственных энергий оптических фононов большинства переходных металлов и металлических боридов (LaB_6 , YB_6 , LuB_{12} , ZrB_{12} , MgB_2) в широкой области температур. Сравнение экспериментальных и расчётных данных позволило получить оценки параметров электрон-фононного взаимодействия и частот электронной релаксации и корректно разделить вклады ангармонизма и электрон-фононного взаимодействия в наблюдаемые температурные зависимости частот оптических фононов [50].

Активно сотрудничают с теоретиками Л.В. Номерованная и А.А. Махнев. В их совместных работах по кобальтатам LaCoO_3 , HoCoO_3 , $\text{RBaCo}_2\text{O}_{5,5}$ ($\text{R}=\text{Eu}, \text{Gd}$) изучен переход металл-изолятор, влияние нестехиометрии по кобальту в слоистом $\text{GdBaCo}_{2-x}\text{O}_{5+\delta}$ с разным содержанием кислорода ($\delta=0,32, 0,07$). Обнаружена частичная блокировка электронных переходов в узкой спектральной области 0,5–0,8 эВ, связанная с ослаблением вклада от межзональных переходов $\text{Co}(3d)-\text{Co}(3d)$. В зонной щели изученных кристаллов обнаружен высокий уровень поглощения, обусловленный структурным беспорядком, дефектами и вакансиями [51]. Исследованы особенности оптических свойств и электронной структуры в сильно-коррелированных соединениях $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ ($x=0-2,0$) при переходе металл-изолятор. Обнаружены изменения оптических функций от состава $x=0$, при котором материал является антиферромагнитным изолятором, к составам $x>0,2$, когда система переходит в состояние парамагнитного металла. Показана необходимость учёта корреляционных поправок для АФМ изолятора Ca_2RuO_4 [52].

В работе Е.И. Шредер и А.В. Лукьянова проведены оптические исследования и выполнены первопринципные расчёты электронной структуры сплавов Гейслера Co_2MeZ ($\text{Me}=\text{Cr, Fe; Z}=\text{Al, Sn, Si}$). Установлено, что изменение состава сплава сопровождается значительным изменением оптических свойств и, следовательно, электронной структуры. Выделена группа сплавов с аномальным поведением оптических свойств на ИК-частотах. Результаты обсуждены с позиции формирования псевдощели в плотности электронных состояний на уровне Ферми [53].

В настоящее время лаборатория оптики металлов динамично развивается. Приходят новые молодые научные сотрудники, аспиранты и студенты, проходящие практику. Под руководством В.И. Анисимова защищено 15 кандидатских и две докторские (М.А. Коротин (2004 г.), С.В. Стрельцов (2014 г.)) диссертации. Десять его учеников – кандидатов и докторов наук – в настоящее время работают в ИФМ.

В.И. Анисимов, М.М. Кириллова

Список литературы

1. М.М. Носков, ДАН СССР **31**, 2 (1941).
2. М.М. Носков, ЖЭТФ **17**, 964 (1947).
3. Я.И. Френкель, ЖЭТФ **12**, 4676 (1942).
4. М.М. Носков, А.В. Соколов, ЖЭТФ **17**, 969 (1947).
5. А.В. Соколов, *Оптические свойства металлов*. Физматгиз, Москва (1961) 464 с. (Blackie, London, 1965).
6. J.R. Beattie, G.K.T. Conn, Phil. Mag. **46**, 222 (1955).
7. В.Л. Гинзбург, Г.П. Мотулевич, УФН **55**, 769 (1955).
8. М.М. Kirillova, Yu.V. Knyazev, Phase Trans. **36**, 43 (1991).
9. Yu.V. Knyazev, M.M. Noskov, Phys. Stat. Sol. (b) **80**, 11 (1977).
10. В.Г. Топольский, В.П. Широковский, М.М. Кириллова, Л.В. Номерованная, ФММ **52**, 745 (1981).
11. В.В. Немошкаленко, В.Н. Антонов, Вл.Н. Антонов, М.М. Кириллова, А.Е. Красовский, Л.В. Номерованная, ЖЭТФ **90**, 201 (1986).
12. Yu.V. Knyazev, L.M. Sandratskii, J. Phys.: Condens. Matter. **3**, 9667 (1991).
13. *Landolt-Börnstein Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik. Bd. 15, Metalle: Elektronische Transportphänomene*, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York – Tokio (1985).
14. В.М. Маевский, Г.А. Болотин, ФММ **36**, 241 (1973).
15. В.М. Маевский, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук, ИФМ УНЦ СССР, Свердловск (1983).
16. А.В. Дружинин, И.Д. Лобов, В.М. Маевский, Письма в ЖТФ **7**, 1100 (1981); **11**, 879 (1985).
17. А.В. Дружинин, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук, ИФМ УНЦ СССР, Свердловск (1986).
18. Е.С. Глускин, А.В. Дружинин, М.М. Кириллова, В.И. Кочубей, Л.В. Номерованная, В.М. Маевский, Оптика и спектроскопия **55**, 891 (1983).
19. А.Б. Шайкин, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук, ИФМ УНЦ СССР, Свердловск (1986).
20. М.М. Кириллова, В.Ю. Трубицын, А.Б. Шайкин, В.П. Широковский, ЖЭТФ **93**, 605 (1987).
21. Ю.С. Поносов, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук, ИФМ УрО РАН, Свердловск (1990).
22. И.И. Сасовская, С.А. Шабаловская, А.И. Лотков, ЖЭТФ **77**, 2341 (1979).
23. Л.М. Артемьев, Е.С. Косякина, В.М. Смелянский, М.М. Кириллова, А.П. Владимиров, М.В. Малютин, В.В. Мозалев, А. с. №1533172 (1989).
24. L.V. Nomerovannaya, A.A. Makhnev, M.M. Kirillova. Thin solid Films **234**, 531 (1993).
25. Yu.S. Ponosov, G.A. Bolotin, O.V. Gurin, N.M. Chebotaev, A.A. Samokhvalov, S.V. Naumov, Pis'ma Zh. Exper. Theor. Fiz. **48**, 380 (1988).
26. Ю.С. Поносов, Л.В. Номерованная, А.А. Махнев, Г.А. Болотин, ФТТ **36**, 3332 (1994).
27. Л.В. Номерованная, В.И. Анисимов, Н.А. Попова, Н.Б. Горина, ФММ **65**, 1096 (1988).
28. L.V. Nomerovannaya, V.A. Rassokhin, Phys. Stat. Sol. (a) **79**, 87 (1983).
29. Е.И. Шредер, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург (1998).
30. Е.И. Шредер, А.Д. Свяжин, А.А. Махнев, Оптика и спектроскопия **119**, 960 (2015).
31. Л.М. Сандрацкий, П.П. Гулецкий, ФММ **65**, 234 (1988).
32. П.П. Гулецкий, Ю.В. Князев, М.М. Кириллова, Л.М. Сандрацкий, ФММ **67**, 279 (1989).
33. Ю.В. Князев, Ю.И. Кузьмин, М.М. Кириллова, ФММ **79**, 60 (1995).
34. М.М. Кириллова, Ю.И. Кузьмин, Ю.В. Князев, Е.И. Шредер, ФММ, № 6, 28 (1997).
35. I.D. Lobov, M.M. Kirillova, A.A. Makhnev, L.N. Romashev, V.V. Ustinov, Phys. Rev. B **81**, 13436 (2010).
36. V.I. Anisimov, J. Zaanen, O.K. Andersen, Phys. Rev. B **44**, 943 (1991).
37. V.I. Anisimov, A.I. Poteryaev, M.A. Korotin, A.O. Anokhin, G. Kotliar, J. of Phys.: Cond. Matter. **9**, 7359 (1997).
38. А.О. Shorikov, А.В. Lukoyanov, М.А. Korotin, V.I. Anisimov, Phys. Rev. B **72**, 024458 (2005).
39. А.И. Poteryaev, N.A. Skorikov, V.I. Anisimov, M.A. Korotin, Phys. Rev. B **93**, 205135 (2016).
40. А.О. Shorikov, А.В. Lukoyanov, V.I. Anisimov, S.Y. Savrasov, Phys. Rev. B **92**, 35125 (2015).
41. S.L. Skornyakov, N.A. Skorikov, A.V. Lukoyanov, A.O. Shorikov and V.I. Anisimov, Phys. Rev. B **81**, 174522 (2010).
42. S. Lee, J.-G. Park, D.T. Adroja, D. Khomskii, S.V. Streltsov, K.A. McEwen, H. Sakai, K. Yoshimura, V.I. Anisimov, D. Mori, R. Kanno, R. Ibberson, Nature Materials **5**, 471 (2006).
43. А.А. Dyachenko, А.О. Shorikov, А.В. Lukoyanov, V.I. Anisimov, Phys. Rev. B **93**, 245121 (2016).
44. J. Kunes, A.V. Lukoyanov, V.I. Anisimov, R.T. Scalettar, W.E. Pickett, Nature Materials **7**, 198 (2008).
45. V. Dremov, Ph. Sapozhnikov, A. Kutepov, V. Anisimov, M. Korotin, A. Shorikov, D.L. Preston, M.A. Zocher, Phys. Rev. B **77**, 224306 (2008).

46. A.S. Belozеров, V.I. Anisimov, J. of Physics: Condens. Matter **28**, 345601 (2016).
47. Dm.M. Korotin, V.V. Mazurenko, V.I. Anisimov, S.V. Streltsov, Phys. Rev. B **91**, 224405 (2015).
48. Yu.S. Ponosov, A.V. Ushakov, S.V. Streltsov, Phys. Rev. B **91**, 195435 (2015).
49. Yu.V. Knyazev, A.V. Lukoyanov, Yu.I. Kuz'min, B. Maji, K.G. Suresh, J. Alloys and Compounds **588**, 725 (2014).
50. Yu.S. Ponosov, S.V. Streltsov, Phys. Rev. B **94**, 214302 (2016).
51. L.V. Nomerovannaya, A.A. Makhnev, S.V. Streltsov, I.A. Nekrasov, M.A. Korotin, V.A. Anisimov, J. Phys.: Condens. Matter. **16**, 5129 (2004).
52. Л.В. Номерованная, А.А. Махнев, Д.Е. Кондаков, М.А. Коротин, В.И. Анисимов, И. Маено, ФММ **95**, 29 (2003).
53. Е.И. Шредер, А.А. Махнев, А.В. Лукоянов, К.Г. Суреш, ФММ **118** (2017).

ЛАБОРАТОРИЯ

полупроводников и полуметаллов

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Якунин Михаил Викторович, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.
- Арапов Юрий Григорьевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Бобин Семен Борисович, младший научный сотрудник
- Говоркова Татьяна Евгеньевна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Гудина Светлана Викторовна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Дерюшкин Всеволод Владимирович, младший научный сотрудник
- Жевстовских Ирина Владимировна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Ильченко Екатерина Владимировна, инженер-исследователь
- Коробейников Игорь Витальевич, младший научный сотрудник
- Курочка Кирилл Викторович, инженер
- Лончаков Александр Трофимович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Луговых Андрей Михайлович, младший научный сотрудник
- Миньков Григорий Максевич, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Михеев Виктор Михайлович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., доцент
- Морозова Наталья Владимировна, младший научный сотрудник
- Новокшенов Сергей Георгиевич, научный сотрудник, к.ф.-м.н., доцент
- Окулов Всеволод Игоревич, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор
- Петухов Денис Сергеевич, младший научный сотрудник
- Петухова Ольга Евгеньевна, младший научный сотрудник
- Попов Михаил Рудольфович, младший научный сотрудник
- Савельев Александр Павлович, младший научный сотрудник
- Суркова Татьяна Петровна, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н., доцент
- Умерова Юлия Александровна, старший инженер
- Усик Александр Юрьевич, инженер-исследователь
- Харус Герман Иосифович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Чарикова Татьяна Борисовна, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Шелушнина Нина Геннадьевна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Шерстобитов Андрей Александрович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ полупроводников и полуметаллов

Лаборатория полупроводников и полуметаллов организована в Институте физики металлов в 1960 г. Исааком Михайловичем Цидильковским, будущим академиком РАН. Незадолго до этого, в 1957 г., он приехал в тогдашний Свердловск из далёкого Дагестанского филиала АН СССР по приглашению академика С.В. Вонсовского развивать здесь физику полупроводников. К этому времени И.М. Цидильковский уже имел большой опыт экспериментальных исследований и их глубокого теоретического анализа, полученный под руководством работавшего в то время в Махачкале профессора В.П. Жузе. Успехам способствовал высокий уровень образования, полученного в годы учёбы в Киевском Университете, где на лекциях и семинарах профессоров В.Е. Лашкарева и С.И. Пекара он и выбрал свой путь в науке.

Лаборатория быстро стала авторитетным центром полупроводниковых исследований. В 60-е гг. здесь был выполнен большой цикл исследований квантовых явлений переноса в сильных магнитных полях, оптических и сверхвысокочастотных свойств полупроводников, явлений переноса под действием высокого давления. Сильные магнитные поля появились в лаборатории благодаря успешному созданию установок импульсных магнитных полей, позволявших получать существенные по тем временам величины поля до 50 Тл и не требовавших



Академик И.М. Цидильковский – основатель лаборатории полупроводников полуметаллов (фото Р.В. Поморцева)

большого количества дорогого жидкого гелия. Благодаря этим экспериментальным возможностям был обнаружен и всесторонне изучен предсказанный теоретиками из Физико-технического института А.Ф. Иоффе – В.Л. Гуревичем и Ю.А. Фирсовым – новый тип осцилляций магнитосопротивления, названных магнитофонным резонансом [1], открыты аналогичные осцилляции, обусловленные слабыми многофонными или спин-орбитальными взаимодействиями. Новые возможности раскрылись при рассмотрении кинетики неравновесной системы «горячих» электронов в сильных электрических полях. Эти работы получили мировое признание, породили новые экспериментальные методы изучения энергетического спектра электронов и дырок в полупроводниках, а также деталей фононного спектра, – магнитофонную спектроскопию, – в дальнейшем широко используемую в крупнейших мировых центрах сильных магнитных полей (Оксфорде, Гренобле, Тулузе, Штутгарте и других).

Природная склонность И.М. Цидильковского к обобщению, поиску глубинных причин, определяющих всё богатство и разнообразие электрофизических свойств и специфические особенности конкретных полупроводников, задали общий тренд формирования лаборатории. Люди именно с такими качествами пришли сюда реализовать свои потребности к исследовательской деятельности. В 1972 г. И.М. Цидильковский выпустил фундаментальную монографию «Электроны и дырки в полупроводниках» [2], обобщающую достигнутые к тому времени методы теоретических расчётов и экспериментального определения основных характеристик электронных спектров. Отдельные достижения лаборатории также вошли в книгу. Можно считать, что сотрудники лаборатории косвенно способствовали высокому фундаментальному уровню этой книги, поскольку именно на них Исаак Михайлович «обкатывал» её материал: каждый из сотрудников лаборатории был обязан сдать неформальный экзамен по её содержанию, принимавший форму активного обсуждения частей книги. Монография была переведена на ряд языков мира и для многих превратилась в настольную книгу исследователя в соответствующих областях физики. Она была отмечена премией имени А.Ф. Иоффе АН СССР. Позже И.М. Цидильковским были написаны и другие книги в развитие первой, связанные с дальнейшим развитием тематики исследований в лаборатории [3–6].

В 70-80-е гг. в лаборатории интенсивно изучаются вещества с особым энергетическим спектром, получившие название бесщелевых полупроводников, и твёрдых растворов на их основе [4–6]. К бесщелевым относятся HgTe, HgSe и модификация α -Sn. Отличительной их особенностью является отсутствие щели между зонами проводимости и валентной зоной, поэтому в твёрдых растворах с традиционным полупроводником, например в $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, величина щели сильно зависит от доли обычного полупроводника

х, меняясь от нуля до существенных величин. Возможность синтезировать полупроводник с заданной малой щелью оказалась весьма затребованной в технике и породила бум исследований этих веществ во всём развитом мире. В лаборатории изучаются электронные фазовые переходы в бесщелевых полупроводниках при воздействии сильных магнитных полей, высоких давлений, трансформации их энергетического спектра при деформациях под воздействием одноосного давления. Изучаются особенности примесных состояний и роль примесного беспорядка в формировании электронной структуры бесщелевых и узкощелевых полупроводниковых материалов. Эти исследования были отмечены Государственной премией СССР за 1982 г.

Работы по изучению бесщелевых полупроводников получили продолжение в исследованиях так называемых полумагнитных полупроводников, представляющих собой твёрдый раствор бесщелевого полупроводника и обычного с магнитной компонентой (то есть с d-элементом). Цикл работ [7, 8], посвящённых изучению электронных свойств полумагнитных полупроводников, отмечен премией имени М.В. Ломоносова (1994 г.).

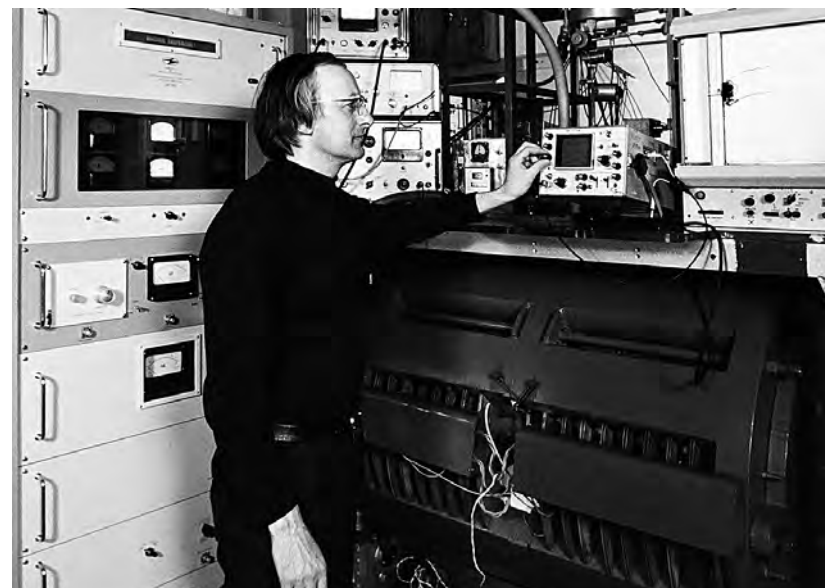
Уникальной особенностью твёрдых растворов на основе бесщелевых полупроводников является высокая чувствительность их электронных состояний к магнитному полю, температуре и уровню легирования, что позволило обнаружить и исследовать разные типы переходов металл – диэлектрик, как под влиянием внешних воздействий, так и вследствие электронных корреляций. Проведённые в лаборатории исследования внесли значительный вклад в решение этой проблемы, которая является фундаментальной для всей физики конденсированного состояния.

Квантовый эффект Холла

Одно из ярких открытий 80-х гг. – это квантовый эффект Холла (КЭХ), обнаруженный Клаусом фон Клитцингом в 1980 г. в высокосовершенных двумерных слоях кремниевого полевого транзистора в сильных магнитных полях. Наглядное проявление эффекта – формирование площадок в холловском магнитосопротивлении на высоте, определяемой только фундаментальными константами: $\rho_{xy}(B) = h/ie^2$, где $i = 1, 2, 3, \dots$ – целые числа, h – постоянная Планка, e – элементарный заряд. Вскоре после этого открытия почти вся мировая физика полупроводников стал двумерной и, далее, одномерной, нульмерной. Ограниченная размерность даёт яркие и неожиданные эффекты в полупроводниках, но при одном условии – материал должен быть высокосовершенным, чтобы длина свободного пробега существенно превышала размеры исследуемой структуры, и были надёжно реализованы условия размерного квантования. Это требует высокой технологии, не достаточно развитой в России на тот момент. Поэтому некоторое время сотрудникам лаборатории приходилось наблюдать со стороны за раз-

витиём этой интересной области исследований. Постановка такой технологии в лаборатории требовала больших вложений, что в то время было нереально. Проблема была решена тем, что в первой половине 90-х было налажено сотрудничество с Нижегородским госуниверситетом, где на тот момент уже были получены достаточно совершенные многослойные структуры с двумерными слоями р-Ge. Из проведённых в лаборатории исследований впервые был найден КЭХ в валентной зоне германия и исследован ряд закономерностей эффекта в этом материале [9–10]. В частности, было обнаружено явление разделения дырочного газа в квазидвумерных слоях Ge на два двумерных слоя у противоположных границ относительно широкого слоя Ge, то есть самоорганизованный эффект формирования двойной квантовой ямы при увеличении ширины слоя Ge от 20 до 40 нм [11]. Яркий признак этого процесса – исчезновение плато КЭХ с номером $i = 1$ в широких слоях.

Таким образом мы подошли к исследованиям физики весьма интересных объектов – двойных квантовых ям (ДКЯ). Привлекательным здесь является то, что современная технология позволяет создать барьер между двумя двумерными слоями толщиной менее среднего расстояния между электронами в отдельном слое полупроводника. Поэтому межслойные корреляции становятся более существенными, чем корреляционные явления в отдельно взятом слое. Благодаря тонкому барьеру проявляется другое важное свойство ДКЯ – туннельная щель в энергетическом спектре, что существенно модифицирует этот спектр. Также ДКЯ – это удобный объект для исследований физики, связанной с заполнением нескольких подзон размерного квантования, поскольку здесь можно сделать сколь угодно малым расстояние до второй подзоны (антисимметричной), отщеплённой от первой (симметричной) на величину туннельной щели. Весьма необычны трансформации в энергетическом спектре ДКЯ под действием магнитного поля, направленного строго параллельно слоям. В этом случае проявляется формирующийся в магнитном поле градиент вектор-потенциала в k -пространстве в направлении (y), перпендикулярном как полю (x), так и оси размерного квантования (z). В результате энергетические спектры отдельных слоёв ДКЯ смещаются друг относительно друга вдоль k_y на величину, пропорциональную параллельному полю. При наличии туннельной щели это приводит к формированию сингулярных точек в спектре ДКЯ у краёв туннельной щели, которая оказывается привязанной к точке (анти) пересечения двух смещённых по k_y ветвей спектра. Такие сингулярности ярко проявляются в магнитотранспорте, служа индикатором существования ДКЯ и достаточно высокой симметричности профиля её потенциала [12]. В лаборатории был выполнен цикл исследований указанных особенностей магнитотранспорта в ДКЯ, созданных в системе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ (по нашему заказу в том же Нижегородском университете), позволяющих сочетать описанную специфику



Юрий Григорьевич Арапов, многолетний заместитель И.М. Цидильковского и исполнявший обязанности зав. лаб. в тяжёлые 90-е годы. Он сумел сохранить (с минимальными потерями) коллектив лаборатории. Активно инициировал развитие исследований 2D-систем (фото Р.В. Поморцева)

с характерными для InAs относительно большими спиновыми расщеплениями электронных уровней. Исследования проведены как в строго параллельном поле, так и в наклонных полях, когда эффекты параллельного поля сочетались с эффектами квантования спектра под действием перпендикулярной компоненты поля. Обнаружены эффекты трансформации спиновых щелей в туннельные с поворотом поля, осциллирующее поведение туннельных щелей с полем при фиксированном наклоне поля, эффекты модификации структуры квантового Холла из-за влияния хвостов плотности состояний уровней Ландау, которые особенно велики в ДКЯ из-за группирования уровней в пучки по 4 уровня и др. [13, 14].

В начале XXI в. в мире были достигнуты существенные успехи в создании двумерных слоёв HgTe, и оказалось, что бесщелевой спектр этого материала приводит к весьма своеобразному спектру в условиях размерного квантования. Обусловлено это гибридизацией состояний лёгких носителей и тяжёлых, электронов и дырок, которые совершенно различным образом проявляются в актуальной области энергий в окрестностях уровня Ферми. Баланс между этими качественно различными состояниями радикально меняется с изменением толщины слоя HgTe. При критической толщине 6,3–6,5 нм формируется дираковский конический энергетический спектр, аналогичный таковому в монослое графена, но со своей спецификой. При меньших толщинах в зоне проводимости актуальны электроноподобные состояния лёгких носи-

телей, а при больших толщинах и зона проводимости, и валентная зона формируются состояниями с преимущественным вкладом тяжёлых дырок.

Впервые двумерные структуры со слоями HgTe были получены в Вюрцбурге, Германия. А несколько позже технологию получения таких достаточно качественных структур удалось наладить в Новосибирске, в Институте физики полупроводников СО РАН. В результате сотрудничества с этим институтом в лаборатории появились возможности реализовать накопленный ранее потенциал исследования объёмных бесщелевых материалов для аналогичных исследований HgTe в условиях размерного квантования. При этом полезными оказались накопленный ранее опыт изучения ДКЯ и налаженная методика детальных исследований магнитотранспорта в наклонных магнитных полях. Таким образом лаборатория сформировала свою нишу в общей массе ведущихся в мире исследований двумерных структур на основе HgTe, предложив технологам создать ДКЯ со слоями HgTe. Что было успешно реализовано и позволило получить ряд оригинальных результатов исследования магнитотранспорта в ДКЯ на основе гетероструктур $Cd_xHg_{1-x}Te/HgTe$.

Среди прочих особых свойств HgTe важным является также большая величина спиновых расщеплений: в объёмном материале величина g-фактора $|g| \approx 35$. Это позволило обнаружить интересные особенности в стереоскопической картине осцилляций магнитосопротивления двумерного слоя HgTe как функции двух компонент магнитного поля – перпендикулярной слоям и параллельной: $\rho_{xx}(B_{\perp}, B_{\parallel})$ [15]. На полученных экспериментально функциях в виде поверхности, состоящей из выстроенных вдоль B_{\parallel} хребтов,

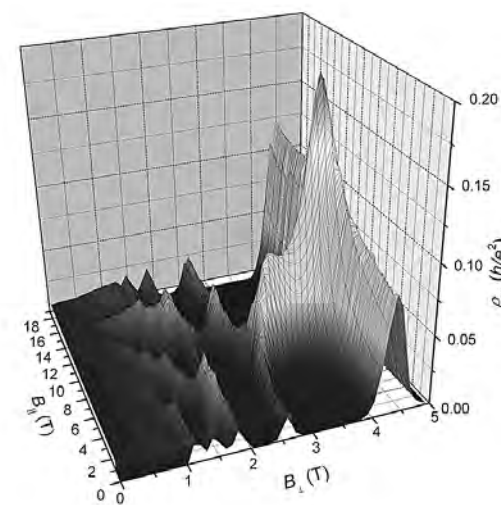


Нам уже 50. Юбилей лаборатории в 2010 г. В первом ряду в центре заведующий лабораторией в 1997–2013 гг. Всеволод Игоревич Окулов

выделяются характерные вершины, соответствующие так называемому эффекту совпадений спиновых уровней при определённых углах наклона поля [16]. Через эти вершины можно провести выходящие из нулевого поля прямые лучи, и по углам наклона этих лучей относительно оси B_{\perp} вычислить величину g-фактора, которая оказалась близка к величине в объёмном материале. Но на полученной картине чётко видно, что через данные вершины можно провести и другую серию прямых лучей, не восходящих из нуля, а нисходящих из определённой точки на оси $B_{\parallel} = B_0$. Было доказано, что точка B_0 определяет величину параллельного поля, при котором достигается полная спиновая поляризация электронного газа. Таким образом найден инструмент для определения параметра, важного для характеристики и приложений в области спинтроники.

Обнаружено неожиданное свойство этих вершин: с улучшением качества образца (определяемого, например, как рост времени жизни электронов; может регулироваться ИК-подсветкой) они подавлялись. Найдено объяснение этого явления: в обстоятельствах ожидаемого совпадения уровней (например, с ростом угла наклона поля ожидается пересечение спиновых уровней) на самом деле имеет место антикроссинг, т.е. уровни сближаются до некоторой конечной величины, а далее назад расходятся, не совпадая. Причина такого поведения связана с обменным взаимодействием, которое понижает энергию уровней при перетекании электронов с уровня одной спиновой ориентации на уровень с другой ориентацией и происходящей таким образом спиновой поляризации электронного газа. При повышении качества уровни становятся тоньше, и полнее реализуются условия спиновой поляризации. Также неожиданным оказалось то, что эффекты подавления вершин немонотонным образом меняются с B_{\perp} , что было объяснено сложной игрой противоположных тенденций, в частности, влиянием компоненты B_{\parallel} на обменную добавку к энергии.

Множество новых явлений было обнаружено в ДКЯ в системе $Cd_xHg_{1-x}Te/HgTe$. При относительно широких слоях HgTe (исследовались ДКЯ со слоями шириной $dw \approx 20$ нм) модификации свойств одиночного слоя при объединении в ДКЯ сводились преимущественно к возможности увеличить перекрытие зон проводимости и валентной за счёт добавления межслойного перекрытия, при этом пе-

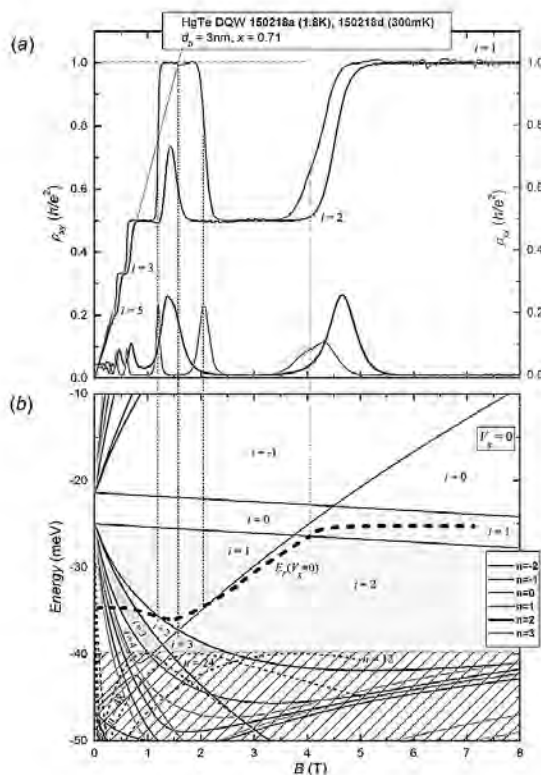


Продольное МС $\rho_{xx}(B_{\perp}, B_{\parallel})$ слоя HgTe толщиной 20 нм. Видно как вершины совпадений укладываются вдоль определенных траекторий

рекрытие можно регулировать с помощью напряжения V_g на нанесённом на поверхность структуры затворе [17]. Увеличенное перекрытие привело к созданию новых условий реализации квантового эффекта Холла, а именно – при открытии щели в условиях хорошо выраженного квантования в уровни Ландау. Это привело к существованию хорошо выраженной фазы с нулевым фактором заполнения магнитных уровней, к многократным переключениям между электронными и дырочными фазами с ростом магнитного поля и т.п. Было обнаружено, что с напряжением V_g сильно изменяется концентрация дырок в ДКЯ, тогда как концентрация сосуществующих электронов меняется очень слабо. Было доказано, что такое различие объясняется на порядок большей плотностью состояний у края валентной зоны, чем в зоне проводимости из-за боковых максимумов валентной зоны.

Необычный зонный спектр формируется в ДКЯ, состоящей из слоёв HgTe критической толщины $dw = 6,3-6,5$ нм. В одиночном слое такой толщины в одной точке сходятся состояния лёгких

и тяжёлых носителей, и при формировании ДКЯ большая туннельная щель образуется только между уровнями легких носителей. Таким образом получается спектр, похожий на таковой в двуслойном графене, но со своей спецификой, в частности, из-за расположенных близко по энергии боковых максимумов валентной зоны. В рассчитанной картине магнитных уровней такого объекта из-за наложения уровней электронов, лёгких дырок и тяжёлых дырок формируются щели локализованных состояний, которые на графике зависимости от магнитного поля имеют вид не расходящихся полос, как обычно, а треугольников и других более сложных конфигураций. Что отражается в необычной структуре наблюдаемого КЭХ [18]. Здесь мы обнаружили возвратный КЭХ и связанный с этим явлением аномальный пик холловского сопротивления $\rho_{xy}(B)$, разделяющий две области полей, характеризующихся различающейся в разы плотностью мобильных дырок. Мы нашли объяснение столь необычного поведения в локализации значительной части дырок в состояния боковых максимумов в



Необычная структура КЭХ в ДКЯ со слоями HgTe критической толщины 6,5 нм, содержащая аномальный пик $\rho_{xy}(B)$ (a) и ее объяснение на основе рассчитанной картины уровней (b)

слабых полях при сосуществующей проводимости оставшейся небольшой части дырок по состояниям лёгких дырок, тогда как в сильных полях уровень Ферми, следуя за наложенным электронным уровнем, поднимается вверх по энергии и выходит из области энергий локализованных состояний боковых максимумов. Таким образом, наблюдаемые переходы плато-плато КЭХ в сильных полях справа от аномального пика дают информацию о полной концентрации дырок p . Эта величина сильно изменяется при подсветке и под влиянием напряжения затворе. При этом осцилляции $\rho_{xx}(B)$ слева от аномального пика определяют взаимные положения энергии боковых максимумов и подзоны лёгких дырок. Эти осцилляции почти не меняются при внешних воздействиях.

Квантовые фазовые переходы изолятор – металл – изолятор и концепция скейлинга

Квантовый эффект Холла (КЭХ) – это универсальное явление для всех двумерных (2D) электронных систем в перпендикулярном магнитном поле. Уже в пионерских работах (см. ссылки в обзоре [19]), посвящённых объяснению природы КЭХ, было показано, что его реализация требует наличия узких полос делокализованных состояний вблизи центров уровней Ландау, при условии, что все остальные состояния локализованы.

Переходы между плато на картине холловского магнитосопротивления в режиме КЭХ могут быть описаны последовательным прохождением уровня Ферми через полосы локализованных и делокализованных состояний. По современным представлениям [20] переходы плато – плато КЭХ являются квантовыми фазовыми переходами изолятор – металл – изолятор и могут анализироваться в рамках концепции скейлинга. В лаборатории проведены обширные исследования эффектов скейлинга в режиме КЭХ в различных гетеросистемах с различным характером беспорядка. При этом особое внимание уделялось материалам с хорошо выраженными спиновыми расщеплениями.

Проведён анализ переходов плато – плато КЭХ на основе гипотезы двухпараметрического скейлинга для квантовых фазовых переходов для гетероструктур $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x \approx 0.2$) с одиночной или двойной квантовыми ямами до и после инфракрасной (ИК) подсветки [21]. Обнаружено, что истинно скейлинговое поведение (степенная зависимость ширины перехода плато-плато КЭХ) наблюдается для уровней Ландау с малыми номерами, $N = 0+, 1\pm$, в наиболее качественных образцах с наибольшей концентрацией и подвижностью носителей.

Для гетероструктур $n\text{-InGaAs}/\text{GaAs}$ после ИК-подсветки построены диаграммы двухпараметрического скейлинга и определены первый (relevant), κ , и второй (irrelevant) μ_c , критические ин-



Михаил Викторович Якунин несёт тяжёлую ношу руководства лабораторией с 2013 г.

дексы. Найдены следующие значения параметров: $\kappa = 0,25 \pm 0,04$ (при $T < 2$ К), $\mu_\sigma \approx 1,2$ для 0^+ -пика в структуре с одиночной квантовой ямой и $\kappa = 0,21 \pm 0,02$, $\mu_\sigma \approx 1,0$ для пиков 1^- и 1^+ в структуре с двойной квантовой ямой. Экспериментально найденные значения первого критического индекса κ прекрасно соответствуют теоретическим оценкам для случая короткодействующего примесного потенциала при учёте экранированного электрон-электронного взаимодействия ($\kappa = 0,21$).

В сочетании материала $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ можно достичь существенно больших долей InAs , а значит существенно больших величин g -фактора. В этом материале нами исследованы переходы плато-плато квантового эффекта Холла в гетероструктурах $n\text{-In}_{0,85}\text{Ga}_{0,15}\text{As}/\text{In}_{0,82}\text{Al}_{0,18}\text{As}$ с близкой к единице долей InAs [22]. Наблюдался переход от высокотемпературного неуниверсального скейлингового режима к низкотемпературному универсальному режиму скейлинга с критическими показателями $\kappa = (0,5 \div 0,69) \pm 0,020$ и $\kappa = (0,21 \div 0,35) \pm 0,02$, соответственно, с температурой перехода ~ 6 К. Низкотемпературные значения κ хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями для систем с короткодействующим электрон-электронным взаимодействием, они наблюдались ранее как для спин-вырожденных, так и для спин-расщеплённых уровней Ландау в системах с квантовыми ямами InGaAs с различным содержанием InAs . Высокотемпературные значения κ коррелируют с экспериментальными результатами для систем с крупномасштабным случайным потенциалом, например, такие значения регулярно получают в классических и наиболее изученных модуляционно-легированных гетероструктурах $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$.

Из наших исследований температурных зависимостей ширины переходов плато – плато КЭХ $\nu_0(T)$ [23] показана возможность реализации скейлингового режима квантовых фазовых переходов для квантовой ямы HgTe с инвертированным зонным спектром ($d_{\text{QW}} = 20,3$ нм). Реальное скейлинговое поведение $\nu_0(T) \sim T^\kappa$ наблюдалось для перехода плато-плато $1 \rightarrow 2$ ($\nu_c = 1,5$) в широком интервале температур $T = 2,9\text{--}30$ К; в этом случае критический коэффициент $\kappa = 0,54 \pm 0,01$. Это значение находится в хорошем соответствии с другими экспериментальными данными для систем с крупномасштабным примесным потенциалом.

Возможность реализовать КЭХ при высоких температурах в структурах $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ с критической шириной квантовой ямы $d_{\text{QW}} \approx d_c = 6,3$ нм, благодаря формированию закона дисперсии, аналогичного таковому у безмассовых фермионов в графене [24–26], создаёт новые возможности для проверки предсказаний теории двухпараметрического скейлинга относительно критического поведения проводимости при квантовых фазовых переходах плато – плато КЭХ и плато – диэлектрик. Исследования данной проблемы, как для одиночного слоя HgTe , так и для ДКЯ в этой гетеросистеме, сейчас интенсивно ведутся в лаборатории.

В целом, как для $\text{InxGa}_{1-x}\text{As}$, так и для HgTe , в наших работах были получены значения критических индексов, соответствующие (в пределах разумных погрешностей) предсказаниям теории и «классическим» значениям, наблюдавшимся ранее на традиционных полупроводниковых системах. С другой стороны, обе системы, как и структуры на основе GaAs , продемонстрировали важность учёта таких факторов, как масштаб случайного потенциала и межчастичное взаимодействие при обсуждении универсальности полученных из эксперимента значений критических индексов.

Высокотемпературная сверхпроводимость

Вторая половина 80-х гг. – это также эпоха всемирной гонки в поисках высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) [27] с максимальной критической температурой, инициированной открытием в 1986 году Карлом Мюллером и Георгом Беднорцем сверхпроводимости при температурах существенно выше наблюдавшейся ранее. К тому же найдено это было в неожиданном материале – в керамиках на основе купратов. Технология получения этих веществ на начальном этапе была относительно несложна и весьма разнообразна, поэтому в ряде институтов России были синтезированы вещества этого класса, и сотрудничество с этими институтами позволило одной из групп лаборатории полупроводников под руководством А.Н. Пономарева подключиться к исследованиям этого рода. В результате впервые выполненных комплексных исследований кинетических эффектов (электропроводности, эффекта Холла и термоэдс) ВТСП LaSrCuO , YBaCuO , YBa(Li,K,Lu)CuO было установлено, что в данном классе соединений имеют место общие закономерности в характере изменения кинетических коэффициентов, что проявляется при изменении состава и при отклонении от стехиометрии. Впервые было установлено, что в соединении LaSrCuO в области нормального состояния преобладает дырочная проводимость, полученные данные позволили определить концентрацию носителей заряда (дырок) и их подвижность. В поликристаллах LaSrCuO был обнаружен новый тип резистивного состояния, который характеризовался гистерезисными и релаксационными эффектами. Результаты комплексных исследований электрических и магнитных свойств ВТСП указывали на единую природу наблюдаемых особенностей: наличие гистерезиса сопротивления и намагниченности, наличие остаточного сопротивления и остаточной намагниченности, релаксация этих величин по логарифмическому закону.

Дальнейшие исследования гальваномагнитных эффектов в ВТСП позволили определить такие важнейшие параметры ВТСП как нижнее и верхнее критические магнитные поля, длину когерентности, коэффициент анизотропии сопротивления в нормальной фазе. Впервые было надёжно установлено, что наблюдаемая в резистивном состоянии инверсия знака коэффициента Холла об-

условлена переходом от режима пиннинга абрикосовских вихрей к режиму их вязкого течения. Исследования электрического сопротивления в магнитных полях выше второго критического поля позволили установить температурную зависимость сопротивления при температурах ниже критической вплоть до $T = 0,2$ К. Логарифмический закон возрастания сопротивления при понижении температуры характерен для систем с двумерной проводимостью и определяется вкладом электрон-электронного взаимодействия и интерференционными поправками к проводимости.

Первые исследования проводились на керамических образцах, что затрудняло исследования истинных свойств сверхпроводников, поэтому были налажены творческие связи с технологами из МГУ (г. Москва) – Л.И. Леонюк, ИФТТ (г. Черноголовка) – Г.А. Емельченко и МИФИ (г. Москва) – Н.А. Бабушкиной и А.А. Ивановым. Тесное сотрудничество с ними позволило получить надежные монокристаллы и монокристаллические плёнки высокотемпературных сверхпроводников, таких как $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$.

С 1998 г. вскоре после открытия высокотемпературных сверхпроводников с электронным типом легирования группа основное внимание стала уделять гальваномагнитным и транспортным исследованиям монокристаллов и монокристаллических плёнок соединения $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$. Уже первые исследования температурных зависимостей $\rho_{\text{об}}(T)$ на серии монокристаллов $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ с $0 \leq x \leq 0,20$ позволил провести их анализ на основе представлений теории неупорядоченных 2D-систем в сопоставлении с данными для других меднооксидных ВТСП. Было установлено, что СП-переход в области оптимального легирования $0,14 \leq x \leq 0,18$ происходит только в кристаллах с достаточно малой степенью беспорядка ($k_{\text{FI}} \geq 2$, где l – длина свободного пробега). СП-переход совместим с режимом слабой 2D-локализации, пока радиус локализации превосходит характерный размер куперовской пары. Температура СП-перехода в области оптимального легирования монотонно возрастает с ростом параметра k_{FI} , т.е. с уменьшением беспорядка в кристалле. Дегградация СП-свойств при дальнейшем увеличении степени легирования ($x > 0,18$) связана с переходом от 2D к 3D-проводимости в монокристалле. Показано, что с ростом нестехиометрического беспорядка (δ) сопротивление образцов в нормальной фазе растёт, а температура СП-перехода понижается. Наблюдаемую эволюцию от металлического (сверхпроводящего) состояния к диэлектрическому можно рассматривать как индуцированный беспорядком переход Андерсона в двумерной системе.

В результате комплексных исследований была выяснена детальная картина изменения фазовых состояний в слоистых сверхпроводящих системах при изменении нестехиометрического беспорядка и степени изовалентного и неизовалентного легирования в результате исследования тензора электросопротивления

в отсутствие внешнего магнитного поля и под действием внешнего магнитного поля в слоистых сверхпроводящих соединениях $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ и $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$, а также получены данные о симметрии спаривания в электронном сверхпроводнике $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$.

В настоящее время группа также активно работает, а результаты их исследований высоко оценены научным сообществом. Получены новые экспериментальные данные и проведён их анализ в рамках современных теорий ВТСП. Обнаружено изменение знака коэффициента Холла в нормальном состоянии, достигаемом при температуре $T = 4,2$ К в магнитном поле $H > H_{c2}$, электронно-легированного сверхпроводника $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ при изменении содержания легирующей примеси Ce с отрицательного в недолегированной и оптимально легированной области ($x = 0,14; 0,15$) на положительный в перелегированной области ($x = 0,18$). Наблюдаемое поведение коэффициента Холла свидетельствует о существовании двух типов носителей заряда – электронов и дырок, что обусловлено реконструкцией поверхности Ферми по мере увеличения уровня легирования. Установлено, что магнитопольные зависимости коэффициента Холла электронно-легированного сверхпроводника $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ в широкой области легирования церием ($x = 0,14 - 0,18$) и с различной степенью нестехиометрического беспорядка (δ) показывают наличие аномального поведения эффекта в области смешанного состояния, а именно инверсию знака эффекта Холла по отношению к его знаку в нормальном состоянии. Вся совокупность экспериментальных магнитопольных зависимостей продольной и холловской компонент сопротивления количественно проанализирована на основании разработанного теоретического описания в рамках модели Друде-Лоренца для нормального состояния и модели Бардина-Стефена для смешанного состояния (режим свободного течения потока абрикосовских вихрей) с учётом вкладов двух типов носителей заряда – электронов и дырок. Соотношение концентраций электронов ($n = 6,9 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$) и дырок ($p = 1,1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$) $n > p$ в недолегированной области ($x = 0,14$) и $n = 1,6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $p = 1,2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ – $n \ll p$ в перелегированной области может быть связано с различием вида поверхности Ферми для этих областей вследствие изменения уровня легирования. Обнаружено, что в сверхпроводнике $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ с $x = 0,14; 0,15$ и с различной степенью нестехиометрического беспорядка (δ) наблюдается два вида температурных зависимостей верхнего критического поля $H_{c2}(T)$: зависимости с положительной кривизной $H_{c2}(T)$ в оптимально и не оптимально отожжённых соединениях и обычные БКШ-зависимости в соединениях без отжига. Показана возможность непротиворечивым образом объяснить все экспериментально наблюдаемые зависимости $H_{c2}(T)$ на основе двузонной/двухщелевой модели сверхпроводника в грязном пределе (модели Гуревича) для различного соотношения коэффициентов диффузии электронов и дырок.

Акустические исследования

В начале 2000-х гг. в лаборатории полупроводников и полуметаллов В.И. Окуловым было инициировано создание нового для лаборатории направления исследований различных полупроводников с помощью ультразвуковой методики. Оказалось, что допирование кристаллов $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$ примесями переходных элементов малой концентрации (порядка 10^{17} – 10^{20} см⁻³) вызывает значительное изменение упругих свойств, проявляющееся в возникновении аномалий на температурных или магнито-полевых зависимостях поглощения и скорости ультразвука. Аномалии упругих свойств напрямую связаны с электронным состоянием примесного атома, и их интерпретация требовала развития новых теоретических представлений. Прежде всего это касалось бесщелевых полупроводников, в которых были обнаружены аномалии транспортных свойств, связанных с гибридизацией примесных и зонных состояний. Детальное сравнение экспериментальных особенностей, проявляющихся в ультразвуковом эксперименте, с теорией позволило получить новую информацию о параметрах таких гибридизированных состояний.

В широкозонных полупроводниках $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$, содержащих примеси переходных элементов, исследование ультразвуковых свойств оказалось успешным вследствие того, что введение примеси приводит к локальному искажению решётки, и если направление этих искажений совпадает с направлением смещений, создаваемых упругой волной, то в определённой температурной области наблюдается аномальное поведение упругих параметров. Анализ таких особенностей на основе современных теоретических представлений позволяет определять тип симметричных искажений и параметры, характеризующие энергетическую поверхность адиабатического потенциала такого примесного центра. Данная информация является важной с научной и технической точки зрения, поскольку широкозонные полупроводники традиционно используются в качестве элементной базы для создания лазеров, устройств оптоэлектроники и спинтроники, но она часто недоступна для получения другими физическими методами, что позволяет говорить о создании с помощью ультразвука нового направления исследований в физике полупроводников.

Соединения $A^{II}B^{VI}$ с примесями 3d- переходных металлов

В середине 80-х гг. прошлого столетия в лаборатории полупроводников и полуметаллов при активном участии И.М. Цидильковского сформировалось и в настоящее время продолжает существовать и развиваться направление исследования соединений $A^{II}B^{VI}$ (как широкозонных, так и бесщелевых) с примесями 3d-переходных металлов. Эти примеси, образующие в полупроводни-

ках $A^{II}B^{VI}$ с ионно-ковалентными связями глубокие уровни, за счёт своих энергетических состояний и спинов существенно изменяют оптические и магнитные свойства исходных материалов, приводя к новым возможностям их практического применения. Задачи практического использования соединений $A^{II}B^{VI}:3d$ в области спинтроники, лазерных технологий, акусто- и оптоэлектроники требуют всестороннего исследования их физических свойств. В рамках комплексного подхода, объединившего исследования кинетических, термодинамических и акустических эффектов для широкозонных полумагнитных полупроводников $ZnX:M$ ($X = Se, S, Te; M = Ni^{2+}, V^{2+}, Cu^{2+}, Fe^{2+}, Cr^{2+}, Co^{2+}$) в лаборатории проведено систематическое исследование теплопроводности при температурах ниже дебаевской. В этих же системах впервые исследованы симметричные модули упругости и коэффициент поглощения ультразвука для продольных и обеих поперечных ультразвуковых волн. Для бесщелевых полумагнитных полупроводников впервые из эксперимента определена электронная составляющая теплопроводности (объект – селенид ртути, легированный железом). В бесщелевых полумагнитных полупроводниках на примере селенида ртути с примесями железа и кобальта впервые исследована решёточная теплопроводность. Обнаружены и объяснены её резонансно-подобные низкотемпературные аномалии. Практическое и фундаментальное значение проведённых исследований состоит в следующем.

- На примере полумагнитных полупроводниковых соединений $A^{II}B^{VI}:3d$ показано, что низкотемпературную решёточную теплопроводность можно использовать как эффективный метод исследования расщепления основного орбитального состояния примесных 3d-ионов в структуре сфалерита. Этот метод допускает распространение и на другие ионы с частично заполненными внутренними оболочками в структуре сфалерита, а также вюрцита.
- Найден простой способ оценки по температуре минимума теплопроводности энергетических зазоров в структуре расщепления основного орбитального состояния иона 3d-переходного металла в кубических кристаллах $A^{II}B^{VI}$, основанный на установленной для соединений $A^{II}B^{VI}:3d$ корреляции в температурной локализации аномалий двух тепловых эффектов – термодинамического (максимума теплоемкости от вклада Шоттки) и кинетического (резонансного минимума решёточной теплопроводности).
- Предложен новый способ определения симметрии локальной ян-теллеровской деформации в кубических кристаллах $A^{II}B^{VI}:3d$ по наличию пика в акустическом поглощении поперечной волны определённой поляризации. Этот способ, основанный на фундаментальном эффекте орбитально-решёточного взаимодействия акустической

волны с 3d-ионами, можно использовать и в других ян-теллеровских системах.

- Селенид цинка, легированный хромом, предложен в качестве главного элемента устройства поляризатора и анализатора поперечных акустических колебаний – аналога поляроида для световых колебаний.
- Выявленное строгое соответствие температуры максимума поглощения ультразвука определённому 3d-иону и поляризации поперечной волны можно применять на практике для идентификации того или иного 3d-иона в кубических матрицах A^IV^VI .
- Эффект аномально сильного поглощения ультразвука, обнаруженный в кристалле $ZnSe:Cr^{2+}$, может быть использован на практике для обнаружения и измерения малых (до $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) концентраций хрома в этом соединении.
- Показано, что в бесщелевых полупроводниках для выделения электронной компоненты теплопроводности наиболее подходящим является способ, основанный на использовании магнитопольевой зависимости продольного эффекта Нернста-Эттингсгаузена.

Достижения в области эксперимента дополняются глубокими теоретическими исследованиями специфики примесных 3d-состояний в бесщелевых полупроводниках. Так, например, развитые теоретические представления о гибридизированных примесных и зонных состояниях позволили объяснить ряд аномалий в температурной и концентрационной зависимости подвижности электронов, необычное температурное поведение электронной и решёточной теплопроводности, теплоёмкости и скорости распространения ультразвуковых волн в монокристаллах $HgSe:3d$. К последним достижениям теории следует отнести предсказание спонтанной спиновой поляризации электронов в гибридизированных состояниях, получившее экспериментальное подтверждение в обнаружении аномального эффекта Холла в кристаллах $HgSe:3d$ в широкой области температур – от гелиевой до комнатной. В итоге был предложен новый – термодинамический механизм аномального эффекта Холла, отличный от спин-орбитального и топологического (связанного с наличием в системе ненулевой кривизны Берри) механизмов.

Оптические исследования

В 70–90-е гг. в лаборатории активно работала группа оптики, которой руководил Геннадий Павлович Скорняков. В группе работала Тамара Павловна Чукина – одна из первых сотрудников института.

Виктор Иванович Соколов, Светлана Ивановна Мартынова, пришедшая в лабораторию после окончания химического факультета Ленинградского университета, и поступившие в аспирантуру к Г. П. Скорнякову, Татьяна Петровна Суркова и Владимир Леони-

дович Константинов. Помимо исследования оптических свойств классических полупроводников A^3B^5 , проводились исследования оптических свойств редкоземельных соединений (В.Л. Константинов), и велись работы по получению и исследованию плёнок двуокиси олова и окиси индия, обладающих уникальным набором свойств: твёрдостью и химической стойкостью, прекрасной адгезией к подложке, близкой к металлической электропроводностью и одновременно высокой прозрачностью в видимой области спектра и высокой отражающей способностью в ближнем ИК-диапазоне. Работа велась в рамках договоров с ГИПО, г. Казань. Позднее к этой работе присоединилась пришедшая из УПИ Лидия Витальевна Астафьева. В группе оптики работали также Валерий Викторович Черняев, Наталья Анатольевна Москвина, Галина Назырова и аспирант из Азербайджана Аркадий Мамедов. Основной темой исследования стало изучение экситонов, связанных с примесями переходных металлов.

В 2000-е гг. и по настоящее время в лаборатории успешно в рамках широкого международного сотрудничества проводятся оптические исследования широкозонных полупроводников и твёрдых растворов на их основе, легированных примесями 3d-переходных металлов (Т.П. Суркова).

Ю.Г. Арапов, С.В. Гудина, И.В. Жевстовских, А.Т. Лончаков, В.И. Окулов, Т.П. Суркова, Г.И. Харус, Т.Б. Чарикова, Н.Г. Шелушина, М.В. Якунин

Защищенные докторские диссертации, подготовленные в лаборатории полупроводников и полуметаллов

Соколов В.И. «Спектроскопия экситонов, связанных с примесями 3d-элементов, в полупроводниках A^2B^6 » (1988).

Ляпилин И.И. «Явления переноса в узкощелевых полумангнитных полупроводниках» (1989).

Пономарев А.И. «Электронные кинетические явления в полупроводниковых и ВТСП соединениях с примесями замещения и собственными дефектами» (1998).

Якунин М.В. «Квантовые гальваномагнитные явления в полупроводниках с вырожденным энергетическим спектром носителей тока» (2001).

Чарикова Т.Б. «Гальваномагнитные эффекты в слоистых сверхпроводящих соединениях с разной степенью беспорядка» (2010).

Лончаков А.Т. «Тепловые и акустические свойства соединений II-VI с примесями 3d-переходных металлов» (2010).

Защищенные кандидатские диссертации, подготовленные в лаборатории полупроводников и полуметаллов

Давыдов А.Б. «Электропроводность n-Ge и n-Si в сильных СВЧ-полях» (1967).

Поморцев Р.В. «Электропроводность полупроводников в сильных электрических и магнитных полях» (1968).

Аксельрод М.М. «Магнитофононный резонанс в антимониде индия» (1970).

Глузман Н.Г. «Термогальваномагнитные явления в электронном германии в сильных магнитных полях» (1971).

Харус Г.И. «Продольное магнитосопротивление полупроводников в квантовых магнитных полях» (1971).

Пономарев А.И. «Квантовые гальваномагнитные явления в некоторых полупроводниках со структурой сфалерита» (1971).

Доманская Л.И. «Термомагнитные эффекты в условиях сильного легирования и электрон-фононного увлечения» (1972).

Шелушина Н.Г. «Кинетические явления в разбавленных немагнитных сплавах» (1972).

Соколов Вл.И. «Исследование явлений переноса в сильных магнитных полях в n-Ge, n-InAs и n-GaAs» (1972).

Матвеев Г.А. «Исследование примесной проводимости в электронном германии в сильных магнитных полях» (1976).

Демчук К.М. «Исследование явлений переноса в антимониде и арсениде индия под давлением» (1977).

Суркова Т.П. «Природа проводимости и оптические свойства легированных плёнок двуокиси олова» (1977).

Константинов В.Л. «Оптические исследования окислов и сульфидов редкоземельных элементов» (1978).

Потапов Г.А. «Исследование осцилляций Шубникова – де Гааза в узкощелевых полупроводниках» (1980).

Поникаров Б.Б. «Исследование кинетических свойств бесщелевых полупроводников $Hg_{1-x}Mn_xTe$ » (1981).

Нейфельд Э.А. «Гальваномагнитные эффекты в $HgTe$ и $Hg_{1-x}Cd_xTe$ в сильных магнитных полях» (1982).

Сабирзянова Л.Д. «Особенности эффекта Шубникова – де Гааза в узкощелевых полупроводниках» (1982).

Арапов Ю.Г. «Акцепторные состояния и особенности гальваномагнитных явлений в бесщелевых полупроводниках $Hg_{1-x}Cd_xTe$ » (1982).

Черняев В.В. «Экситоны, связанные с изоэлектронными примесями, в полупроводниках со структурой цинковой обманки» (1983).

Щенников В.В. «Влияние высокого давления на кинетические эффекты в халькогенидах ртути и кадмия» (1984).

Захаров В.А. «Поверхностные волны в полупроводниках» (1985).

Жебелев С.И. «Разогрев электронов в кремнии на сверхвысоких частотах» (1985).

Якунин М.В. «Магнитофононный резонанс на дырках в германии» (1985).

Штрапенин Г.Л. «Магнитоплазменные явления и фотопроводимость в узкощелевых полупроводниках на СВЧ» (1986).

Мамедов А.Н. «Экситоны, связанные с примесями переходных металлов, в полупроводниках A^2B^6 » (1986).

Городилов Н.А. «Влияние особенностей электронного спектра и примесных состояний на термо- и гальваномагнитные эффекты в бесщелевых кристаллах $HgTe$, $Hg_{1-x}Cd_xTe$ и $Hg_{1-x}Mn_xTe$ » (1988).

Лончаков А.Т. «Особенности явлений переноса в n-Ge вблизи перехода металл – диэлектрик» (1989).

Зверева М.Л. «Переход металл-диэлектрик, индуцированный магнитным полем в неоднородных кристаллах n- $Hg_{0,8}Cd_{0,2}Te$ » (1989).

Крылов К.Р. «Кинетические явления в высокотемпературных сверхпроводниках» (1993).

Чарикова Т.Б. «Термогальваномагнитные эффекты и релаксационные явления в высокотемпературных сверхпроводниках» (1995).

Неверов В.Н. «Эффекты локализации и квантовый эффект Холла в гетероструктурах p Ge/GeSi» (1998).

Игнатенков А.Н. «Гальваномагнитные эффекты в смешанном и нормальном состояниях ВТСП кристаллов $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4-\delta}$ » (1999).

Альшанский Г.А. «Энергетический спектр и подвижность носителей заряда в двумерных полупроводниковых структурах» (2002).

Ташлыков А.О. «Электронные кинетические явления в ВТСП соединениях с примесями замещения и нестехиометрическими дефектами» (2008).

Карсканов И.В. «Эффекты межэлектронного взаимодействия в квантовых гальваномагнитных явлениях в полупроводниковых гетероструктурах p- и n-типа» (2009).

Говоркова Т.Е. «Эффекты гибридизации электронных состояний примесей переходных металлов в низкотемпературных свойствах селенида ртути» (2010).

Клепикова А.С. «Переходы плато-плато квантового эффекта Холла в полупроводниковых наноструктурах на основе арсенида галлия и индия» (2016).

Список литературы

1. Р.В. Парфеньев, Г.И. Харус, И.М. Цидильковский, С.С. Шалыт, УФН **112**, 3 (1974).
2. И.М. Цидильковский, *Электроны и дырки в полупроводниках*, Наука, Москва, (1972), 640 с.
3. И.М. Цидильковский, *Зонная структура полупроводников*, Наука, Москва, (1978), 328 с.
4. И.М. Цидильковский, *Бесщелевые полупроводники – новый класс веществ*, Наука, Москва, (1986), 238 с.
5. И.М. Цидильковский, Г.И. Харус, Н.Г. Шелушина, *Примесные состояния и явления переноса в бесщелевых полупроводниках*, Изд-во УНЦ АН СССР, Свердловск, (1987), 152 с.

6. И.М. Цидильковский, *Примесные состояния и явления переноса в бесщелевых полупроводниках*, Изд-во УрО АН СССР, Свердловск, (1991), 152 с.
7. И.И. Ляпилин, И.М. Цидильковский, УФН **146**, 35 (1985).
8. И.М. Цидильковский, УФН **162**, 63 (1992).
9. О.А. Кузнецов, Л.К. Орлов, Р.А. Рубцова, А.Л. Чернов, Ю.Г. Арапов, Н.А. Городилов, Г.Л. Штрапенин, Письма в ЖЭТФ **54**, 351 (1991).
10. Ю.Г. Арапов, Н.А. Городилов, В.Н. Неверов, М.В. Якунин, А.В. Германенко, Г.М. Миньков, О.А. Кузнецов, Л.К. Орлов, Р.А. Рубцова, А.Л. Чернов, Письма в ЖЭТФ **59**, 247 (1994).
11. Yu.G. Arapov, G.I. Harus, V.N. Neverov, N.G. Shelushinina, M.V. Yakunin, G.A. Alshanskii, O.A. Kuznetsov, Nanotechnology **11**, 351 (2000).
12. M.V. Yakunin, G. Galistu, A. de Visser, Physica E **40**, 1451 (2008).
13. М.В. Якунин, С.М. Подгорных, В.Н. Неверов, ЖЭТФ **132**, 241 (2007).
14. M.V. Yakunin, G. Galistu, A. de Visser, S.M. Podgornykh, Yu.G. Sadofyev, N.G. Shelushinina, G.I. Harus, J. Phys.: Conf. Ser. **150**, 022100 (2009).
15. M.V. Yakunin, S.M. Podgornykh, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, Physica E **42**, 948 (2010).
16. M.V. Yakunin, A.S. Suslov, S.M. Podgornykh, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, Phys. Rev. B **85**, 245321 (2012).
17. M.V. Yakunin, A.S. Suslov, M.R. Popov, E.G. Novik, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, Phys. Rev. B **93**, 085308 (2016).
18. М.В. Якунин, С.С. Криштопенко, С.М. Подгорных, М.Р. Попов, В.Н. Неверов, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, Письма в ЖЭТФ **104**, 415 (2016).
19. B. Huckestein, Rev. Mod. Phys. **67**, 367 (1995).
20. B. Kramer, T. Ohtsuki, and S. Kettemann, Phys. Rep., **417**, 211 (2005).
21. А.С. Клепикова, Ю.Г. Арапов, С.В. Гудина, В.Н. Неверов, Г.И. Харус, Н.Г. Шелушинина, М.В. Якунин, Б.Н. Звонков, ФНТ **43**, 596 (2017).
22. S.V. Gudina, Yu.G. Arapov, V.N. Neverov, S.M. Podgornykh, M.R. Popov, N.G. Shelushinina, M.V. Yakunin, S.A. Dvoretzky, N.N. Mikhailov, Phys. Stat. Sol. **C13**, 473 (2016).
23. Ю.Г. Арапов, С.В. Гудина, В.Н. Неверов, С.М. Подгорных, М.Р. Попов, Г.И. Харус, Н.Г. Шелушинина, М.В. Якунин, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, ФТП **49**, 1593 (2015).
24. A.H. Castro Neto, F. Guinea, N.M.R. Peres, K.S. Novoselov, A.K. Geim, Rev. Mod. Phys. **81**, 109 (2009).
25. A.J.M. Giesbers, U. Zeitler, L.A. Ponomarenko, R. Yang, K.S. Novoselov, A.K. Geim, J.C. Maan, Phys. Rev. B **80** 241411(R) (2009).
26. D.A. Kozlov, Z.D. Kvon, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, S. Weishupl, Y. Krupko, J. C. Portal, Appl. Phys. Lett. **105**, 132102 (2014).
27. Т. Чарикова, Г. Харус, Н. Шелушинина, *Гальваномагнитные эффекты в слоистых сверхпроводящих соединениях*, LAPLAMBERT Academic Publishing, Saarbrucken, Deutschland (2013), 250 p.

ЛАБОРАТОРИЯ

рентгеновской спектроскопии

Состав лаборатории (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Коротин Михаил Аркадьевич, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.
- Белозеров Александр Сергеевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Галахов Вадим Ростиславович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Долгих Виталий Евгеньевич, главный специалист
- Елохина Людмила Васильевна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Ефремов Андрей Викторович, младший научный сотрудник
- Зацепин Дмитрий Анатольевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., доцент
- Кузнецова Татьяна Владимировна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Курмаев Эрнст Загидович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор
- Месилов Виталий Владимирович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Немнонов Сергей Николаевич, ведущий инженер
- Нечкина Лариса Давыдовна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Овечкина Наталья Александровна, научный сотрудник
- Пчелкина Злата Викторовна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Ралдугина Ирина Степановна, старший лаборант
- Свяжин Артем Дмитриевич, научный сотрудник
- Скориков Николай Александрович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Шамин Сергей Николаевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Шкварин Алексей Сергеевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Ярмошенко Юрий Михайлович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ рентгеновской спектроскопии

Лаборатория рентгеновской спектроскопии ИФМ УрО РАН была создана в 1956 г. Сначала она называлась лабораторией рентгено-спектрального анализа, а в 1958 г. была переименована в лабораторию рентгеновской спектроскопии. Организатором лаборатории и её первым заведующим (до 1980 г.) был д. ф.-м.н., профессор Сергей Антонович Немнонов.

Создание этой лаборатории во многом было обусловлено тем, что в годы войны в ИФМ работали московские спектроскописты И.Б. Боровский и М.А. Блохин, которые привезли с собой в Свердловск аппаратуру и занимались в Институте рентгено-спектральным анализом. После их возвращения в Москву стал вопрос, что делать с этой группой, и по предложению В.И. Архарова руководство Института поручило к.ф.-м.н. С.А. Немнонову (первому аспиранту В.И. Архарова) в 1951 г. возглавить это подразделение. С.А. Немнонов сразу же поставил перед собой весьма амбициозную задачу: не просто продолжить заниматься рентгено-спектральным элементным анализом, а изучать с помощью тонкой структуры рентгеновских спектров электронную структуру вещества и преобразовать группу рентгено-спектрального анализа в лабораторию рентгеновской спектроскопии. Это потребовало прежде всего повысить энергетическое разрешение спектральных приборов. После изучения литературы выбор пал на тубус-спектрометр



С.А. Немнонов



В.А. Трапезников

Хаглунда, который не имел ограничений в радиусе кривизны кристалла-анализатора и позволял существенно увеличить дисперсию за счёт использования больших радиусов изгиба кристаллов.

Эта задача была успешно решена Виктором Александровичем Трапезниковым – первым аспирантом С.А. Немнонова, который построил первый тубус-спектрометр (прототип спектрометра Хаглунда), по образцу которого в последующем в экспериментальных мастерских ИФМ было изготовлено несколько аналогичных

приборов (в отдельные времена число таких приборов в лаборатории достигало 10–12 штук).

Научная проблематика лаборатории в первые годы её деятельности была связана с изучением температурных эффектов в рентгеновских спектрах металлов и сплавов с помощью протяжённой тонкой структуры рентгеновского поглощения (так называемой Крониговской структуры; сейчас такие спектры называют EXAFS-спектрами). Нужно отметить, что это были весьма трудоёмкие эксперименты, а полученные в то время результаты не потеряли до сих пор своего значения. На основе полученных результатов В.А. Трапезниковым и была защищена первая в лаборатории кандидатская диссертация в 1956 г. В дальнейшем эта тематика была несколько модифицирована – основное внимание стали уделять тонкой структуре главного края поглощения, которая даёт информацию о распределении вакантных состояний энергетического спектра (сейчас такие спектры называют NEXAFS-спектрами). Кроме того, в лаборатории стали изучать также рентгеновские спектры эмиссии, причём сразу же был взят курс на измерения флуоресцентных (вторичных) рентгеновских спектров, свободных от разложения и окисления исследуемых материалов в процессе возбуждения спектров. Сочетание рентгеновских эмиссионных и абсорбционных спектров позволяло зондировать весь спектр занятых и вакантных состояний, получать полную картину энергетического спектра и проверять существующие модели электронной структуры. В этом отношении очень показательной была диссертация Л.Д. Финкельштейн (1966 г.), в которой исследовались рентгеновские спектры твёрдых растворов соседних 3d-металлов Sc–Ti, Ti–V, V–Cr и было убедительно показано, что для сплавов переходных металлов начала периода действует модель жёсткой полосы [1].

Изучению электронной структуры тугоплавких соединений переходных металлов положила начало диссертация А.З. Меньши-

кова (1962 г.), который по существу продемонстрировал большие возможности рентгеновской флуоресцентной спектроскопии для изучения химической связи в соединениях переходных металлов. В дальнейшем рентгено-спектральные исследования электронной структуры тугоплавких соединений были продолжены К.М. Колобовой (канд. дисс. 1971 г.), Э.З. Курмаевым (канд. дисс. 1969 г.) и его учениками В.П. Белаш (канд. дисс. 1976 г.) и В.М. Черкашенко (канд. дисс. 1979 г.) в содружестве с сотрудниками П.В. Гельда (УПИ), Г.П. Швейкина и А.А. Фотиева (Институт химии УрО РАН).

С появлением А.Н. Гусатинского (ученика М.А. Блохина) в лаборатории стали развёртываться систематические исследования рентгеновских спектров полупроводниковых соединений (канд. дисс. 1971 г.). А.Н. Гусатинский впервые предложил использовать энергетический зазор между спектрами эмиссии и поглощения для определения энергетической щели в полупроводниковых соединениях [2]. Этот метод в дальнейшем получил широкое распространение для исследования энергетической щели в различных соединениях (см. [3–4]). Исследования валентных состояний редких земель в оксидных и сульфидных соединениях по рентгеновским L-абсорбционным спектрам, начатые в свое время С.М. Блохиным в Новосибирске, были продолжены в лаборатории Л.Д. Финкельштейн и Н.Н. Ефремовой (канд. дисс. 1981 г.), которые довели её до количественного уровня [5]. Эти исследования проводились в тес-



Л.Д. Финкельштейн



М.В. Келдыш, С.А. Немнонов, Г.М. Филончик



М.Ф. Сорокина, К.М. Колобова

ном содружестве с А.А. Самохваловым и его сотрудниками (лаб. магнитных полупроводников ИФМ УрО РАН) и сотрудниками лаб. В.Г. Бамбурова (Институт химии УрО РАН).

До конца 70-х гг. основные измерения рентгеновских спектров в лаборатории проводились в коротковолновом диапазоне (1–5 Å). Прорыв в длинноволновую область (до 500 Å) реализован в 1968 г. и связан с приобретением опытного образца спектрометра РСМ-500 производства завода «Буревестник». Уже первые измерения рентгеновских $M_{4,5}$ -э-

миссионных спектров ниобия и молибдена (5p→3d-переход) позволили выявить дополнительную тонкую структуру, соответствующую теоретическим расчётам электронной структуры этих металлов [6]. В дальнейшем измерения длинноволновых рентгеновских спектров в лаборатории проводились В.Е. Долгих, В.М. Черкашенко, В.Р. Галаховым, С.Н. Шаминам и Н.А. Овечкиной. В работах В.М. Черкашенко, В.Р. Галахова, Н.А. Овечкиной и В.Р. Месилова было показано, что энергетическое положение L-эмиссионных спектров 3d-элементов очень чувствительно к состоянию окисления, что может быть использовано для определения концентрации разновалентных ионов в соединениях с переменной валентностью.

Нужно отметить, что исследования рентгеновских эмиссионных спектров химических соединений в коротковолновом диапазоне, проводимые в лаборатории в 60–80 гг., оставили заметный след в рентгеновской спектроскопии. Особенно это относится к анализу происхождения длинноволновых спутников в $K\beta_5$ -эмиссионных спектрах 3d-металлов (4p→1s переход) в химических соединениях. В работах С.А. Немнонова и Э.З. Курмаева было показано, что энергетическое положение этих спутников связано с полуостовными 2s-состояниями атомов неметаллов (В, С, N, О, F и др.), благодаря Me 4p–2s гибридизации [7]. Это, по- существу, открывало возможность определения химического связывания элементов в многокомпонентных соединениях на основе 3d-элементов [8]. В дальнейшем В.И. Нефедовым (ИОНХ РАН, г. Москва) и Э.З. Курмаевым было предложено использовать $K\beta_5$ -спектры переходных металлов для анализа электронного строения и геометрической структуры комплексных соединений [9]. В развитие этих работ Э.З. Курмаевым, В.П. Белаш, А.З. Меньшиковым и Ю.М. Ярмошенко была исследована роль ближайшего окружения в рентгеновских эмиссионных спектрах в сплавах и соединениях и показана возможность определения из рентгеновских $K\beta_5$ -спектров характеристик ближнего порядка в кристаллах [9–11].

Как уже отмечалось выше, в работе Л.Д. Финкельштейн было продемонстрировано, что электронная структура бинарных сплавов, образованных 3d-металлами начала периода (Sc, Ti, V, Cr) достаточно хорошо описывается моделью жесткой полосы. В 70–80 гг. лаборатория снова обращается к этой тематике (Э.З. Курмаев, В.П. Белаш, В.Г. Зырянов, В.А. Трофимова, М.Ф. Сорокина). В качестве бинарных сплавов были выбраны сплавы титана, ванадия и хрома, в которых второй компонент (3d, 4d, 5d) варьировался по всему периоду. Эти исследования убедительно показали, что с ростом атомного номера второго компонента сплава в K-эмиссионных спектрах титана и ванадия появляются дополнительные низкоэнергетические полосы, генетически связанные с nd-состояниями второго компонента [12–17]. Таким образом были определены границы применимости модели жесткой полосы, которые определялись степенью локализации d-состояний атомов-компонентов сплава. На основе проведенных исследований были защищены кандидатские (М.Ф. Сорокина 1975 г., В.П. Белаш 1976 г., В.А. Трофимова 1978 г.) и докторская (Э.З. Курмаев 1978 г.) диссертации.

В 1962 г. после стажировки В.А. Трапезникова в Институте физики Уппсальского Университета (Швеция) у проф. К. Зигбана (будущего Нобелевского лауреата) было принято решение о создании первого отечественного рентгеновского фотоэлектронного спектрометра в ИФМ. В 1966–1968 гг. в лаборатории рентгеновской спектроскопии В.А. Трапезниковым, А.В. Ефстафьевым и В.П. Сапожниковым был сделан проект такого спектрометра, а уже в 1972 г. был осуществлён физический пуск нового прибора и получен первый рентгеноэлектронный спектр титана (XPS Ti 2p_{3/2,1/2}). После изготовления и настройки прибора на нём был выполнен цикл исследований, на основе которых были подготовлены кандидатские (И.Н. Шабанова 1974 г., О.И. Ключников 1975 г., А.И. Ефименко 1976 г., В.И. Повстугар 1977 г.) и докторская (В.А. Трапезников, 1976 г.) диссертации. В 1977 г. группа В.А. Трапезникова переезжает в Ижевск и составляет ядро вновь созданного Физико-технического института УрО РАН, первым директором которого и становится В.А. Трапезников.

В 1980 г. заведующим лаборатории становится Э.З. Курмаев. С его приходом была проведена полная модернизация спектральной аппаратуры, развёрнуты численные расчёты электронной структуры и установлено широкое международное сотрудничество. Модернизация аппаратуры прежде всего коснулась реконструкции рентгеновских спектрометров и их перевода с фотографического на ионизационный методы регистрации с использованием позиционно-чувствительных детекторов [18]. Это позволило сократить чис-



Э.З. Курмаев

ло приборов с 10 до 3-х и существенно повысить эффективность их работы. Огромную роль в переоснащении приборного парка лаборатории сыграли В.Е. Долгих, В.М. Черкашенко и Ю.М. Ярмошенко. В 1991 г. при поддержке академика С.В. Вонсовского был приобретён уникальный рентгеновский микроанализатор «Спектронд» с дифракционной решёткой, позволяющий проводить измерения тонкой структуры ультрамягких эмиссионных спектров в микрообъёмах. Этот оригинальный прибор конструкции А.И. Козленкова был выпущен всего в 2-х экземплярах (второй – в ИМЕТ РАН); и с получением этого прибора в лаборатории начинают развёртываться исследования электронной структуры поверхности раздела фаз (интерфейсов) [19–22] (С.Н. Шамин, канд. дисс. 2010 г., В.Р. Галахов, докт. дисс. 2002 г.). В 1989 г. Э.З. Курмаеву в составе авторского коллектива была присуждена Государственная премия РСФСР «За существенный вклад в развитие рентгеноспектрального метода и его использование для изучения электронного строения и химической связи в соединениях».

Численные расчёты электронной структуры начали проводиться в лаборатории с приходом аспиранта С.В. Вонсовского – В.И. Анисимова (1978 г.). Сначала эти расчёты проводились в кластерном приближении с использованием метода МО ЛКАО [23–25]. В дальнейшем В.И. Анисимовым был усовершенствован этот метод путём учёта k -зависящих граничных условий [26]. В 1990 г. во время визита в лабораторию проф. О.К. Андерсена (Институт Макса-Планка, Штутгарт) была достигнута договорённость о стажировке В.И. Анисимова в его лаборатории. Результатом этой стажировки стала разработка нового



Э.З. Курмаев, М.А. Коротин, Г.А. Сулопаров, О.К. Андерсен, И.В. Афанасьев, В.И. Анисимов

метода расчета электронной структуры (LDA+U), позволяющего учитывать электронные корреляции и впервые позволившего описать энергетический спектр Моттовских изоляторов [27]. Этот метод получил всемирную известность и до сих пор является основным методом расчёта электронной структуры сильно-коррелированных систем.

В 1981 г. в лабораторию поступает другой аспирант С.В. Вонсовского – А.В. Постников и сразу же включается в проведение расчётов электронной структуры сплавов и соединений, представляющих интерес для интерпретации экспериментальных рентгеновских спектров [28–30]. На основе проведённых им в этот период расчётов он защищает кандидатскую диссертацию в 1985 г. В дальнейшем вокруг В.И. Анисимова формируется целая группа теоретиков (А.В. Постников, М.А. Коротин, И.В. Соловьев, Г.А. Сулопаров, С.Ю. Ежов, А.И. Потеряев, Н.А. Скориков), которые стали активно заниматься расчётами электронной структуры различных классов твёрдых тел. После открытия высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в купратах (1987 г.) лаборатория активно участвует в исследовании электронной структуры этого класса материалов. Сотрудники лаборатории стали соавторами первой статьи, выполненной в ИФМ по этой тематике в 1988 г. [31] и опубликовали серию работ, посвящённых измерениям рентгеновских спектров и расчётам электронной структуры сверхпроводящих купратов [32–36].

Измерения рентгеновских спектров и теоретические расчёты электронной структуры купратов показали, что эти материалы принадлежат к сильно-коррелированным системам и наглядно продемонстрировали эффективность совместного проведения экспериментальных и теоретических исследований, которые становятся визитной карточкой лаборатории. Участие лаборатории в госпрограмме по ВТСП позволило получить лаборатории серию грантов и приобрести рентгеновский микроанализатор JEOL-733 (Япония), на котором Л.В. Елохиной и В.В. Федоренко стали выполняться заказы для всего Института.

Впервые в практике рентгеновской спектроскопии в середине 80-х гг. на лабораторных спектрометрах исследованы малые примеси (до 0,5 ат.%) $3d$ -элементов в сплавах, и найдена зависимость между шириной спектра и локальным спиновым моментом примесного элемента. Под руководством В.Р. Галахова предложен и реализован метод количественного неразрушающего послойного фазового анализа интерфейсов по мягким рентгеновским эмиссионным спектрам, полученным при вариации энергии возбуждающих электронов. Метод апробирован на кремниевых тонких плёнках и мультислоях, подвергнутых внешним воздействи-



А.В. Постников



В.М. Черкашенко, А.М. Прохоров,
В.А. Котельников, В.Е. Щербинин, Э.З. Курмаев

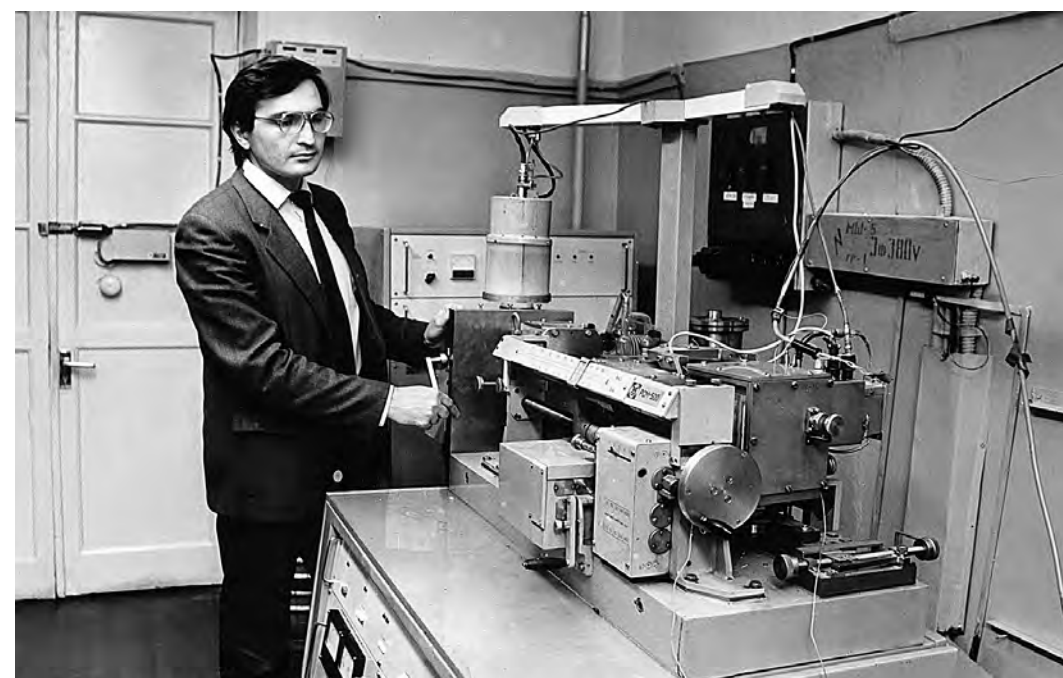
ям. Обнаружен эффект влияния магнитного состояния атомов металла в оксидах и степени ковалентности металл-кислородных связей на относительную интенсивность рентгеновских эмиссионных $L\beta/L\alpha$ полос.

Следует отметить, что до и после исследований ВТСП-купратов лаборатория неоднократно обращалась к изучению электронной структуры сверхпроводящих материалов: соединений со структурой A-15 [37–38], фаз Лавеса [39], тройных сульфидов молибдена (фаз Шевреля) [40–41], MgB_2 [42–43] и пниктидов железа $LaO_{1-x}F_xFeAs$ [44–46]. Особенно показательным было участие лаборатории в исследовании электронной

структуры пниктидов железа. Высокотемпературная сверхпроводимость ($T_c = 26$ К) в этом классе соединений была открыта 23 февраля 2008 г [47]. Поскольку свойства пниктидов железа и купратов во многом оказались похожими, то сразу же встал вопрос о том, проявляются ли в пниктидах, как и в купратах, электронные корреляции. Первый DMFT-расчёт был сделан в марте 2008 г. К. Хауле (США) в ограниченном базисе [48], на основании чего был сделан вывод о том, что эти соединения принадлежат к сильно-коррелированным системам. Второй DMFT-расчёт был выполнен В.И. Анисимовым в октябре 2008 г. уже с учётом As 4p- и O 2p-состояний и не показал присутствия нижней Хаббардовской зоны и квази-частичного пика [49]; был сделан вывод, что $LaOFeAs$ является слабо-коррелированной системой. Окончательную точку в этом споре поставили эксперименты, выполненные сотрудниками лаборатории на источнике синхротронного излучения в Беркли в мае 2008 г. [44], которые показали хорошее соответствие рентгеновских спектров с теоретическим расчётом, выполненным без учёта корреляционных эффектов и не показали присутствия нижней Хаббардовской зоны, предсказанной DMFT-расчётом К. Хауле.

Одним из важных факторов, влияющих на работу лаборатории, является международное сотрудничество. И в этом деле, как показал наш опыт, большую роль могут сыграть бывшие сотрудники лаборатории, работающие сейчас в зарубежных научных центрах и университетах. Прежде всего, здесь следует упомянуть Андрея Викторовича Постникова. После защиты кандидатской диссертации в 1985 г. он получил стипендию Гумбольдта (1987 г.) для проведения расчётов электронной структуры твёрдых тел в Институте Макса Планка (Штутгарт, Германия) под руководством проф. О.К. Андерсена. В 1992 г. А.В. Постников переезжа-

ет в г. Оснабрюк, где присоединяется к группе проф. Борстеля для проведения расчётов ферроэлектриков. Всё это время он не терял связи с лабораторией и с его помощью были установлены тесные связи с группой Манфреда Нойманна в Оснабрюкском Университете, располагающим на тот период одним из лучших лабораторных фотоэлектронных спектрометров с монохроматизированным Al K α -излучением. Совместное исследование рентгеновских эмиссионных и абсорбционных спектров в ИФМ и рентгеновских фотоэлектронных спектров в Оснабрюке на одних и тех же материалах оказалось исключительно плодотворным, так как сочетание указанных спектров позволило получить взаимодополняющую информацию о распределении полных и парциальных плотностей электронных состояний. В результате этого сотрудничества в период с 1994 по 2011 г. было опубликовано 77 совместных работ в ведущих зарубежных журналах. Сотрудничество лаборатории с группой Нойманна в Оснабрюкском Университете оказалось чрезвычайно полезным и для всего Института. При поддержке проф. М. Нойманна был получен совместный проект INTAS, на средства которого было закуплено оборудование для создания компьютерной сети в ИФМ и выхода в Интернет. Кроме того, при поддержке проф. М. Нойманна Институт получил бесплатно из Оснабрюкского Университета машину для сжижения жидкого азота, которая работает в ИФМ и по сей день.



В.Р. Галахов



Enge Zusammenarbeit vereinbart: Prof. E. Z. Kurmaev (von links nach rechts) vom Institut für Metallphysik der Russischen Akademie der Wissenschaften in Jekaterinburg, Hochschuldozent Dr. Manfred Neumann als Osnabrücker Koordinator vom Fachbereich Physik und Prof. Dr. Rainer Künzel, Präsident der Universität Osnabrück.

Foto: Scholz

Neue Kooperation

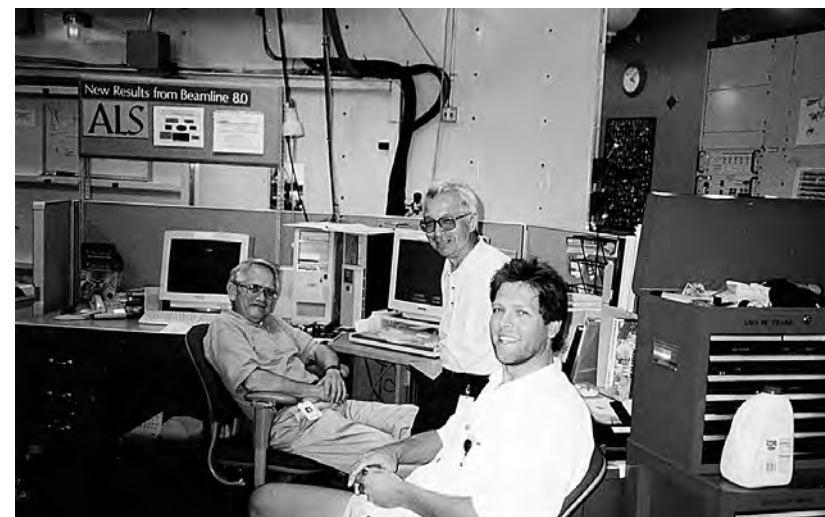
Jekaterinburg Partner der Physik

(red.) Eine intensive Zusammenarbeit vor allem auf dem Gebiet der Festkörperspektroskopie haben der Fachbereich Physik der Universität Osnabrück und das Institut für Metallphysik der Russischen Akademie der Wissenschaften in Jekaterinburg vereinbart. Einen entsprechenden Kooperationsvertrag haben jetzt die Vertreter beider Institutionen unterzeichnet.

Das Abkommen sieht vor allem die Arbeit an grenzüberschreitenden Forschungsprojekten vor. Darüber hinaus sollen der Wissenschafiler Austausch oder die Durchführung von gemeinsamen Tagungen und Seminaren vorangetrieben werden. Der Koordinator auf Osnabrücker Seite, Hochschuldozent Dr. Manfred Neumann, verspricht sich von der neuen Kooperation vielfältige Impulse für die Forschungsarbeit in Osnabrück. Dr. Neumann: „Die Akademie verfügt über ein reichhaltiges Reservoir an höchst interessanten Materialien, die von uns mit großem Erfolg untersucht werden können.“

До 1997 г. основные измерения рентгеновских спектров проводились на лабораторных приборах, хотя уже всё больше стало появляться измерений, выполненных с использованием источников синхротронного излучения (СИ). Препятствием к проведению таких измерений было отсутствие стационарных станций на пучковых линиях.

В то время каждая группа должна была привезти с собой на синхротрон свой спектрометр и потратить определённое время на его установку и тестовые испытания, прежде чем проводить измерения. В 1995 г. на источнике синхротронного излучения 3-го поколения в Беркли (Advanced Light Source, Berkeley National Lab., USA) была сконструирована и установлена первая стационарная станция конструкции Prof. T.A. Callcott (University of Tennessee, USA) для измерений спектров неупругого рассеяния рентгеновских лучей (RIXS-спектров) на пучковой линии 8.01. С этого момента становится возможным различным группам исследователей использовать это оборудование для коллективного пользования. Позднее такие же стационарные станции появились и на других источниках СИ. Лаборатория начала проводить измерения RIXS спектров на синхротроне в Беркли с 1997 г. после полугодовой стажировки Э.З. Курмаева в США и продолжает эти измерения до сих пор. В период с 1997 по 2016 г. по материалам этих исследований опубликовано 170 статей совместно с сотрудниками Prof. D.L. Ederer (University of Tulane, USA) и Prof. A. Moewes (University of Saskatchewan, Canada). Первые же измерения показали, что возможность плавного варьирования энергии возбуждающих фотонов позволяет получить дополнительную информацию об электронной структуре вещества. Прежде всего, это относится к возможности разделения вкладов в плотность электронных состояний



T.A. Калькотт, Э.З. Курмаев, А. Мувес

от неэквивалентных атомов, имеющих различные энергии связи электронов основных уровней. Это было продемонстрировано путём измерения RIXS спектров в соединении Sr_2RuO_4 [50] при энергии возбуждения $E=529,4$ и $534,2$ эВ, соответствующих энергиям связи XPS O 1s-уровней плоскостных и апексных атомов кислорода, соответственно. Другим, весьма эффективным приложением RIXS-спектроскопии, является её использование для изучения дисперсии энергетических зон в кристаллах (band mapping). В 1992 г. теорией было предсказано, что при возбуждении RIXS-спектров возможны только вертикальные переходы с сохранением момента (momentum conservation), и k-селективность может быть достигнута путём вариации энергии возбуждения [51]. Это было реализовано путём измерения RIXS-спектров в MgB_2 , графите, алмазе [52], Si, BP [53], LiBC [54], $\text{Nb}_2\text{B}_2\text{C}$ [55]. Исключительно полезными и принципиально важными оказались измерения RIXS-спектров примесных атомов 3d-металлов в разбавленных магнитных полупроводниках (DMS). Дело в том, что все существующие теоретические модели основаны на гомогенном распределении 3d-примесных атомов в указанных материалах. Между тем магнитные примеси могут занимать не только катионные узлы, но также междоузлия, что может вызывать дополнительное взаимодействие между примесными атомами с образованием металлических кластеров, которое может существенно влиять на формирование магнитных свойств в DMS-соединениях. Проведённые исследования позволили установить, что $L_{2,3}$ -эмиссионные спектры 3d-примесных атомов ($3d4s \rightarrow 2p_{3/2,1/2}$ -переход) в разбавленных магнитных полупроводниках, измеренные вблизи L_2 -порога возбуждения и в нерезонансном режиме, позволяют однозначно определить образова-



М.А. Короткин

ние кластеров из примесных атомов и таким образом оценить степень однородного распределения примесных атомов в DMS-соединениях [56–59].

Признанием высокой эффективности работы лаборатории в этот период и значимости полученных её сотрудниками результатов является получение за период с 1997 по 2007 г. 4-х грантов Президента РФ по программе поддержки ведущих научных школ.

В 2008 г. лабораторию возглавил д.ф.-м.н. Михаил Аркадьевич Короткин. После того, как В.И. Анисимов возглавил лабораторию оптики металлов, куда вместе с ним ушло большинство теоретиков, в лаборатории стал остро ощущаться дефицит теоретических исследований. Поэтому теоретическая группа пополнилась новыми сотрудниками и, кроме Н.А. Скорикова и З.В. Пчелкиной, в ней стали работать А.С. Белозеров и А.В. Ефремов. Перед теоретиками лаборатории была поставлена достаточно сложная задача – разработка нового метода расчёта электронной структуры неупорядоченных систем. В результате была создана компьютерная программа, предназначенная



Сидят: Л.В. Елохина, В.Р. Галахов, Э.З. Курмаев, Л.Д. Финкельштейн, В.А. Трофимова.
 Стоят: Н.А. Скориков, В.М. Черкашенко, Н.Н. Ефремова, П.Ф. Каримов, С.Н. Немнонов, С.Н. Шамин,
 А.С. Шкварин, А.В. Галахов, Р.М. Новгородцева, А.А. Капишев, Н.А. Овечкина, А.В. Ежов, Д.А. Зацепин.
 Фотография 2005 г.

для расчёта спектральных и магнитных свойств соединений с наличием неупорядоченных примесей и/или нестехиометрических твёрдых растворов методом когерентного потенциала, впервые реализованного в формализме функций Грина и базисе локализованных функций Ванье [60]. В программу заложена возможность учёта как статических кулоновских корреляций, так и спин-орбитального взаимодействия.

В экспериментальном плане встал вопрос о выходе на источники синхротронного излучения 3-го поколения, и кроме работ на источнике ALS, Berkeley, USA, сотрудниками лаборатории (В.Р. Галахов, С.Н. Шамин, В.В. Месиков, А.С. Шкварин, Т.В. Кузнецова, А.Д. Свяжин) стали проводиться измерения на источниках СИ BESSY-2, Berlin, Germany; ESRF, Grenoble, France; MAX-LAB-3, Lund, Sweden; ELLETRA, Trieste, Italy; SPRING-8, Himeji, Japan), и рентгеновские исследования с помощью синхротронного излучения стали занимать ведущее место в научной тематике лаборатории.

За всю историю лаборатории в ней были выполнены и защищены 8 докторских и 36 кандидатских диссертаций. Сотрудники лаборатории отмечены различными научными премиями. Опубликовано 9 монографий. Лаборатория является кузницей руководящих научных кадров. Лаборатория располагает оборудованием, позволяющим проводить измерения рентгеновских спектров в диапазоне 1–500 Å, и вычислительной техникой для проведения современных расчётов электронной структуры твёрдых тел.

Э.З. Курмаев, Л.Д. Финкельштейн, М.А. Короткин

Диссертации доктора наук, выполненные в лаборатории рентгеновской спектроскопии

Сергей Антонович Немнонов, «Структура электронных энергетических полос и некоторые свойства переходных металлов, их сплавов и соединений» (1971).

Виктор Александрович Трапезников, «Рентгеноэлектронная и рентгеновская абсорбционная спектроскопия сплавов переходных металлов» (1976).

Эрнст Загидович Курмаев, «Рентгеновская эмиссионная спектроскопия сплавов и соединений на основе переходных металлов» (1978).

Владимир Ильич Анисимов, «Расчёт электронной структуры соединений и сплавов переходных металлов с примесями и дефектами» (1990).

Андрей Викторович Постников, «Микроструктура и динамика решётки в перовскитах из первых принципов» (1998).

Вадим Ростиславович Галахов, «Рентгеновская спектроскопия соединений переходных металлов и гетерогенных образований на их основе» (2002).

Александр Натанович Титов, «Электронные эффекты в термодинамике интеркалатных материалов с сильным электрон-решеточным взаимодействием» (2005).

Игорь Владимирович Соловьев, «Первопринципное моделирование сложных оксидных систем с сильными электронными корреляциями» (2010).

**Диссертации кандидата наук,
выполненные в лаборатории рентгеновской
спектроскопии**

Виктор Александрович Трапезников, «Рентгеноспектроскопическое исследование сплавов железо-молибден» (1956).

Анатолий Зотеевич Меньшиков, «Исследование физической природы тугоплавких и некоторых других соединений хрома методом рентгеновской спектроскопии» (1962).

Лариса Давыдовна Финкельштейн, «О закономерностях строения и заполнения внешних энергетических полос в металлах и сплавах начала первого переходного периода» (1966).

Эрнст Загидович Курмаев, «Рентгеноспектральное исследование структуры энергетических полос металлоподобных соединений элементов четвертой группы (ванадия и ниобия)» (1969).

Виктор Григорьевич Зырянов, «Рентгеновские эмиссионные спектры и структура энергетических полос меди, цинка, алюминия и некоторых их сплавов» (1970).

Клавдия Михайловна Колобова, «Рентгеноспектральное исследование силицидов переходных 3d металлов» (1971).

Аркадий Николаевич Гусатинский, «Рентгеноспектральное исследование межатомного взаимодействия в полупроводниковых AIII BV и других неметаллических соединений» (1971).

Ирина Николаевна Шабанова, «Исследование соединений железа, кобальта, никеля с углеродом и кремнием методом электронной спектроскопии» (1974).

Олег Иванович Ключников, «Исследование сплавов на основе никеля и палладия методом рентгеновской спектроскопии» (1975).

Маргарита Федоровна Сорокина, «Рентгеноспектральное исследование электронной структуры сплавов палладия с благородными металлами» (1975).

Валентина Петровна Белаш, «Рентгеноспектральное исследование электронной структуры бинарных сплавов ванадия с переходными металлами» (1976).

Александр Иванович Ефименко, «Разработка автоматизированного электромагнитного спектрометра для исследования твердых тел» (1976).

Валерий Иванович Повстугар, «Исследование поверхностных явлений на соединениях ванадия и фосфора методом рентгеновской спектроскопии» (1976).

Софья Сергеевна Михайлова, «Рентгеновские спектры и электронная структура сульфидов 3d-4d переходных металлов» (1977).

Виктория Августовна Трофимова, «Исследование электронной структуры бинарных сплавов титана методом рентгеновской спектроскопии» (1978).

Фагамутдин Биктимирович Максютков, «Исследование электронной структуры Fe-Pd и Fe-Mo сплавов методом рентгено-электронной спектроскопии» (1978).

Владимир Михайлович Черкашенко, «Рентгеноспектральное исследование состояния окисления ванадия в соединениях со смешанной валентностью» (1979).

Владимир Ильич Анисимов, «Кластерный подход к расчёту электронной структуры кристаллов (интерпретация спектральных свойств)» (1980).

Надежда Николаевна Ефремова, «Электронный фазовый переход в твердых растворах на основе соединений самария, европия и итербия с неметаллами» (1981).

Виктор Васильевич Федоренко, «Взаимодействие тугоплавких соединений титана с металлами группы железа» (1982).

Юрий Михайлович Ярмошенко, «Рентгеноспектральное исследование электронной структуры бинарных и тройных сплавов и соединений на основе ванадия, ниобия и молибдена» (1984).

Андрей Викторович Постников, «Расчёт электронной структуры примесей 3d-элементов в алюминии и переходных металлах» (1985).

Вадим Ростиславович Галахов, «Рентгеновская L-эмиссионная спектроскопия сплавов и соединений на основе 3d-переходных металлов» (1986).

Людмила Васильевна Елохина, «Исследования взаимной диффузии в сплавах Pt-Pd и Pt-Rh методом рентгеновского микроанализа» (1989).

Михаил Аркадьевич Коротин, «Применение самосогласованных зонных расчётов для анализа электронной структуры, магнитных свойств и рентгеновских спектров эквивалентных интерметаллидов переходных металлов и высокотемпературных сверхпроводников» (1989).

Георгий Анатольевич Суслопаров, «Расчёт электронной структуры и магнитных свойств неупорядоченных бинарных сплавов замещения переходных металлов и ВТСП» (1990).

Вера Ильинична Глазырина, «Химическая диффузия катионов в сложных оксидах со структурой граната и перовскита» (1991).

Сергей Юрьевич Ежов, «Эффекты сильной корреляции в соединениях 3d-металлов: численные расчеты электронной структуры» (1999).

Дмитрий Анатольевич Зацепин, «Рентгеновские спектры и электронная структура сложных оксидов и сульфидов d-металлов» (1999).

Александр Иванович Потеряев, «Численные расчёты электронной структуры сильно коррелированных 3d соединений: выход за рамки приближения локальной электронной плотности» (1999).

Михаил Владимирович Яблонских, «Рентгеновские спектры и электронная структура магнитных сплавов Гейслера и дихалькогенидов 3d металлов» (2000).

Николай Александрович Скориков, «Расчёт электронной структуры sr-элементов и их соединений для анализа спектров резонансного рассеяния рентгеновских лучей» (2008).

Татьяна Владимировна Кузнецова, «Электронная структура интеркалированных дихалькогенидов титана по данным угловой фотоэмиссионной и рентгеновской спектроскопии» (2009).

Сергей Николаевич Шамин, «Электронная структура и фазовый состав тонких плёнок на основе углерода и кремния, определённые методом ультрамягкой рентгеновской спектроскопии» (2010).

Алексей Сергеевич Шкварин, «Электронная структура диселенидов титана, легированных хромом, марганцем и медью, по данным рентгеновской и фотоэлектронной спектроскопии» (2011).

Данила Михайлович Коротин, «Изменение состава и электронной структуры поверхности Ti и сплавов на его основе после внешних воздействий» (2013).

Виталий Владимирович Месилов, «Зарядовые состояния 3d-ионов в наноструктурированных оксидах марганца, железа и кобальта, исследованные методами рентгеновской спектроскопии» (2013).

Список монографий сотрудников лаборатории рентгеновской спектроскопии

С.В. Вонсовский, Ю.А. Изюмов, Э.З. Курмаев, *Сверхпроводимость переходных металлов, их сплавов и соединений*, Наука, Москва (1977), 383 с.

S.V. Vonsovsky, Yu.A. Izyumov, E.Z. Kurmaev, *Superconductivity of Transition Metals, Their Alloys and Compounds*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg-New York, (1982), 512 p.

В.А. Губанов, Э.З. Курмаев, А.Л. Ивановский, *Квантовая химия твёрдого тела*, Наука, Москва (1984), 304 с.

Г.П. Швейкин, С.И. Алямовский, Ю.Г. Зайнулин, А.И. Гусев, В.А. Губанов, Э.З. Курмаев, *Соединения переменного состава*, Изд-во УНЦ АН СССР, Свердловск (1984), 291 с.

Э.З. Курмаев, В.М. Черкашенко, Л.Д. Финкельштейн, *Рентгеновские спектры твёрдых тел*, Наука, Москва (1988), 175 с.

В.И. Анисимов, В.П. Антропов, В.А. Губанов, А.Л. Ивановский, Э.З. Курмаев, А.И. Лихтенштейн, А.В. Постников, *Электронная структура примесей и дефектов в переходных металлах, их сплавах и соединениях*, Наука, Москва (1989), 223 с.

V.A. Gubanov, A.I. Liechtenstein, A.V. Postnikov, *Magnetism and the electronic structure of crystals*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (1992).

Ю.А. Изюмов, Э.З. Курмаев, *Высокотемпературные сверхпроводники на основе FeAs-соединений*, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Москва-Ижевск (2009), 312 с.

Yu. Izyumov, E. Kurmaev, *High- T_c Superconductors Based on FeAs Compounds*, Springer, Heidelberg-Dordrecht-London-New York (2011), 275 p.

Список обзорных статей, написанных сотрудниками лаборатории

Ю.А. Изюмов, Э.З. Курмаев, УФН **113**, 193 (1974).

Ю.А. Изюмов, Э.З. Курмаев, УФН **118**, 53 (1976).

А.Л. Ивановский, В.А. Губанов, Э.З. Курмаев, Г.П. Швейкин, *Успехи химии* **52**, 705 (1983).

А.Л. Ивановский, В.А. Губанов, Ю.Г. Зайнулин, Г.П. Швейкин, Э.З. Курмаев, *Журнал физ. химии* **58**, 1868 (1984).

E.Z. Kurmaev, V.I. Nefedov, L.D. Finkelstein, *Int. J. Mod. Phys. B* **2**, 393 (1988).

E.Z. Kurmaev, L.D. Finkelstein, *Int. J. Mod. Phys. B* **3**, 973 (1989).

E.Z. Kurmaev, L.D. Finkelstein, *Int. J. Mod. Phys. B* **5**, 1097 (1991).

V.I. Anisimov, M.A. Korotin, E.Z. Kurmaev, in *Studies of High Temperature Superconductors. Advances Research and Applications*, Ed. by A. Narlikar, Nova Science Publ., New Delhi (1991), Vol. 8, P.261.

Э.З. Курмаев, *Рентгеновская эмиссионная спектроскопия твёрдых тел*, в сб. *Металлофизика, Наукова думка, Киев*, Вып. 15 (1993), С. 3.

E.Z. Kurmaev, V.R. Galakhov, S.N. Shamin, *Critical Reviews in Solid State and Materials Science*, **23** 65 (1998).

E.Z. Kurmaev, *Inorganic Materials* **41**, S1 (2005).

Ю.А. Изюмов, Э.З. Курмаев, УФН **178**, 25 (2008).

Ю.А. Изюмов, Э.З. Курмаев, УФН **178**, 1307 (2008).

V.M. Zainullina, V.P. Zhukov, M.A. Korotin, *J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev.* **22**, 58 (2015).

Список литературы

1. Л.Д. Финкельштейн, С.А. Немнонов, ФММ **22**, 843(1966).
2. A.N. Gusatinski and S.A. Nemnonov, *Phys. Stat. Sol.* **12**, 749 (1965).
3. E.Z. Kurmaev, R.G. Wilks, A. Moewes, L.D. Finkelstein, S.N. Shamin, J. Kunes, *Phys. Rev. B* **77**, 165127 (2008).
4. J.A. McLeod, R.G. Wilks, N.A. Skorikov, L.D. Finkelstein, M. Abu-Samak, E.Z. Kurmaev, A. Moewes, *Phys. Rev. B* **81**, 245123 (2010).
5. J.A. McLeod, R.J. Green, E.Z. Kurmaev, N. Kumada, A.A. Belik, A. Moewes, *Phys. Rev. B* **85**, 195201 (2012).
6. С.А. Немнонов, Э.З. Курмаев, В.И. Минин, в сб. *Рентгеновские спектры и электронная структура вещества*, Наукова думка, Киев (1969), Т.1, С. 87.
7. С.А. Немнонов, Э.З. Курмаев, ФММ **27**, 816 (1969).

8. В.И. Нефедов, Э.З. Курмаев, М.А. Порай-Кошиц, С.А. Немнонов, Г.В. Цинцадзе, Ж. структ. химии **13**, 637 (1972).
9. E.Z. Kurmaev, V.P. Belash, R. Flukiger, A. Junod, *Solid State Commun.* **16**, 1139 (1975).
10. А.З. Меньшиков, Э.З. Курмаев, ФММ **41**, 748 (1976).
11. Ю.М. Ярмошенко, Э.З. Курмаев, ФММ **51**, 302 (1981).
12. S.A. Nemnonov, E.Z. Kurmaev, B.Kh. Ishmukhametov, V.P. Belash, *Phys. Stat. Sol. (b)* **46**, 77 (1971).
13. В.П. Белаш, С.А. Немнонов, Э.З. Курмаев, ФММ **33**, 1324 (1972).
14. S.A. Nemnonov, E.Z. Kurmaev, V.P. Belash, V.A. Fomichev, *In X-Ray Spectra and Electronic Structure of Matter*, Ed. by A. Faessler and G. Wiech, Munchen, 1973, Vol. 2, 178 p.
15. В.П. Белаш, Э.З. Курмаев, А.З. Меньшиков, С.А. Немнонов, Изв. АН СССР, Сер. физ. **38**, 658 (1974).
16. S.A. Nemnonov, V.A. Trofimova, *Phys. Stat. Sol. (b)* **55**, K111 (1973).
17. V.A. Trofimova, K.M. Kolobova, S.A. Nemnonov, *Fiz. Met. Met.* **50**, 1192 (1980).
18. V.E. Dolgih, V.M. Cherkashenko, E.Z. Kurmaev, D.A. Goganov, E.K. Ovchinnikov, Yu.M. Yarmoshenko, *Nucl. Instrum. Meth.* **224**, 117 (1984).
19. E.Z. Kurmaev, V.V. Fedorenko, S.N. Shamin, F.V. Postnikov, G. Wiech, Y. Kim, *Phys. Scripta* **T41**, 288 (1992).
20. E.Z. Kurmaev, S.N. Shamin, V.R. Galakhov, G. Wiech, E. Majkova, S. Luby, *J. Mater. Res.* **10**, 907 (1995).
21. E.Z. Kurmaev, V.R. Galakhov, S.N. Shamin, T. Rodriguez, A. Almendra, J. Sanz-Maudes, K. Goransson, I. Engstrom, *J. Mater. Res.* **13**, 1950 (1998).
22. E.Z. Kurmaev, V.R. Galakhov, S.N. Shamin, *Critical Reviews in Solid State and Materials Science* **23**, 65 (1998).
23. V.I. Anisimov, V.A. Gubanov, A.I. Ivanovskii, E.Z. Kurmaev, J. Weber, R. Lacroix, *Solid State Commun.* **29**, 185 (1979).
24. V.I. Anisimov, E.Z. Kurmaev, V.A. Gubanov, *Solid State Commun.* **36**, 769 (1980).
25. В.И. Анисимов, В.А. Губанов, Э.З. Курмаев, Журнал структ. химии **21**, 45 (1980).
26. V.I. Anisimov, V.A. Gubanov, D.E. Ellis, E.Z. Kurmaev, *J. Phys.* **F 11**, 1405 (1981).
27. V.I. Anisimov, J. Zaanen, O.K. Andersen, *Phys. Rev. B* **44**, 943 (1991).
28. А.В. Постников, В.А. Губанов, Э.З. Курмаев, В.И. Анисимов, ФММ **54**, 446 (1982).
29. В.Р. Галахов, Э.З. Курмаев, А.В. Постников, В.И. Анисимов, В.А. Губанов, ФММ **56**, 104 (1983).
30. A.I. Kozlenkov, A.I. Shulgina, A.V. Postnikov, E.Z. Kurmaev, A.I. Ivanovskii, V.A. Gubanov, *J. Phys. C: Solid State Phys.* **18**, 3581 (1985).
31. В.Р. Галахов, Б.Н. Гощицкий, В.А. Губанов, С.А. Давыдов, Ю.Ф. Журавлев, М.Г. Землянов, А.Е. Карькин, В.Л. Кожевников, К.Р. Крылов, Э.З. Курмаев, А.Т. Лончаков, А.В. Мирмельштейн и др., ФММ **63**, 829 (1987).
32. В.И. Анисимов, В.Р. Галахов, В.А. Губанов, М.А. Коротин, Э.З. Курмаев, А.И. Лихтенштейн, С.А. Туржевский, В.М. Черкашенко, Ю.М. Ярмошенко, В.П. Антропов, В.Л. Кожевников, Г.В. Базуев, ФММ **65**, 204 (1988).
33. В.И. Анисимов, В.Р. Галахов, Э.З. Курмаев, М.А. Коротин, В.Л. Кожевников, Г.В. Базуев, ФММ **65**, 207 (1988).
34. V.R. Galakhov, C.M. Butorin, L.D. Finkelstein, E.Z. Kurmaev, Yu.M. Yarmoshenko, V.A. Trofimova, *Physica C* **160**, 267 (1989).
35. V.I. Anisimov, M.A. Korotin, E.Z. Kurmaev, *J. Electr. Spectr. Relat. Phenom.* **50**, 213 (1990).
36. L.D. Finkelstein, V.R. Galakhov, V.V. Fedorenko, L.V. Elokina, A.A. Samokhvalov, E.Z. Kurmaev, S.M. Butorin, J. Nordgren, B.V. Slobodin, Yu.A. Teterin, M.I. Sosulnikov, *J. Electr. Spectr. Relat. Phenom.* **68**, 431 (1994).
37. S.A. Nemnonov, E.Z. Kurmaev, V.P. Belash, *Phys. Stat. Sol. (b)* **39**, 39 (1970).
38. Э.З. Курмаев, В.Е. Долгих, Ю.М. Ярмошенко, С.А. Немнонов, ФММ **48**, 1302 (1979).
39. Yu.M. Yarmoshenko, V.N. Kozhanov, V.M. Cherkashenko, E.Z. Kurmaev, E.P. Romanov, *Solid State Commun.* **55**, 19 (1985).
40. Ю.М. Ярмошенко, В.Е. Долгих, Э.З. Курмаев, Н.И. Лобачевская, Н.Н. Ефремова, В.А. Трофимова, В.В. Шумилов, ФММ **66**, 853 (1988).
41. E.Z. Kurmaev, Yu.M. Yarmoshenko, R. Nyholm, N. Martensson, T.J. Arlborg, *Solid State Commun.* **37**, 647 (1981).
42. E.Z. Kurmaev, I.I. Lyakhovskaya, J. Kortus, A. Moewes, N. Miyata, M. Demeter, M. Neumann, M. Yanagihara, M. Watanabe, T. Muranaka, J. Akimutsu, *Phys. Rev. B* **65**, 134509 (2002).
43. N.I. Medvedeva, L.D. Finkelstein, S.N. Shamin, I.I. Lyakhovskaya, E.Z. Kurmaev, *Phys. Solid State* **46**, 1994 (2004).
44. E.Z. Kurmaev, R. Wilks, A. Moewes, N.A. Skorikov, Yu.A. Izyumov, L.D. Finkelstein, R.H. Li, X.H. Chen, *Phys. Rev. B* **78**, 220503(R) (2008).
45. V.I. Anisimov, E.Z. Kurmaev, A. Moewes, I.A. Izyumov, *Physica C* **469**, 442 (2009).
46. E.Z. Kurmaev, J.A. McLeod, A. Buling, N.A. Skorikov, A. Moewes, M. Neumann, M.A. Korotin, Yu.A. Izyumov, *Phys. Rev. B* **80**, 054508 (2009).
47. Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, Hosono, *J. Amer. Chem. Soc.* **130**, 3294 (2008).
48. K. Haule, J. H. Shim, and G. Kotliar, arXiv: 0803.1279 (9 March 2008).
49. V.I. Anisimov, Dm.M. Korotin, M.A. Korotin, A.V. Kozhevnikov, J. Kune, A.O. Shorikov, S.L. Skornyakov, S.V. Streltsov, arXiv: 0810.2629 (15 Oct 2008).
50. E.Z. Kurmaev, S. Stadler, D.L. Ederer, Y. Harada, S. Shin, M.M. Grush, T.A. Callcott, R.C.C. Perera, D.A. Zatsopin, N. Ovechkina, M. Kasai, Y. Tokura, T. Takahashi, K. Chandrasekaran, R. Vijayaraghavan, U.V. Varadaraju, *Phys. Rev. B* **57**, 1558 (1998).
51. Y. Ma, N. Wassdahl et al., *Phys. Rev. Lett.* **69**, 2598 (1992).
52. A.V. Sokolov, E.Z. Kurmaev, S. Leitch, A. Moewes, J. Kortus, L.D. Finkelstein, N.A. Skorikov, C. Xiao, A. Hirose, *J. Phys.: Cond. Mat.* **15**, 2081 (2003).
53. A.V. Sokolov, L.D. Finkelstein, E.Z. Kurmaev, S. Shin, P.F. Karimov, N.A. Skorikov, A.V. Postnikov, *J. Electr. Spectr. Relat. Phenom* **137–140**, 591 (2004).
54. P.F. Karimov, N.A. Skorikov, E.Z. Kurmaev, L.D. Finkelstein, S. Leitch, J. MacNaughton, A. Moewes, T. Mori, *J. Phys.: Cond. Mat.* **16**, 5137 (2004).
55. E.Z. Kurmaev, N.A. Skorikov, A.V. Galakhov, P.F. Karimov, V.R. Galakhov, V.A. Trofimova, Yu.M. Yarmoshenko, A. Moewes, S.G. Chiuzbrian, M. Neumann, K. Sakamaki, *Phys. Rev. B* **71**, 024528 (2005).
56. G.S. Chang, E.Z. Kurmaev, D.W. Boukhvalov, L.D. Finkelstein, D.H. Kim, T-W. Noh, A. Moewes, T.A. Callcott, *J. Phys.: Condens. Matter* **18**, 4243 (2006).

57. G.S. Chang, E.Z. Kurmaev, L.D. Finkelstein, H.K. Choi, W.O. Lee, Y.D. Park, T.M. Pedersen, A. Moewes, J. Phys.: Condens. Matter **19**, 076215 (2007).
58. G.S. Chang, E.Z. Kurmaev, D.W. Boukhvalov, L.D. Finkelstein, S. Colis, T.M. Pedersen, A. Moewes, A. Dinia, Phys. Rev. B **75**, 195215 (2007).
59. G.S. Chang, E.Z. Kurmaev, L.D. Finkelstein, A. Moewes, A. Dinia, J. Electr. Spectr. Relat. Phenom. **181**, 202 (2010).
60. М.А. Коротин, Н.А. Скорилов, В.М. Зайнуллина, Э.З. Курмаев, А.В. Лукоянов, В.И. Анисимов, Письма в ЖЭТФ **94**, 884 (2011).

ОГЛАВЛЕНИЕ

CURRICULUM VITAE Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН. В.В. Устинов	3
Основные направления научных исследований Института – от Уральского физико-технического института (1932) до Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН (2017)	5
Направления научных исследований Института в названиях лабораторий – от четырёх групп УралФТИ (1932) до тридцати лабораторий ИФМ УрО РАН (2017)	15
ОТДЕЛ магнитных материалов	41
История физики магнитных явлений на Урале, Н.В. Мушников, Ю.Н. Драгошанский	49
ОТДЕЛ материаловедения	67
История лаборатории механических свойств, А.В. Макаров, В.В. Сагарадзе	71
История лаборатории физического материаловедения, В.М. Счастливец, Т.И. Табатчикова	101
История лаборатории цветных сплавов, В.Г. Пушин, И.Г. Бродова, Н.Н. Куранова	125
ОТДЕЛ наноспинтроники	143
История лаборатории диффузии, В.В. Попов	147
История лаборатории квантовой наноспинтроники, А.В. Телегин	175
История лаборатории кинетических явлений, К.Н. Михалев	185
История лаборатории магнитных полупроводников, Ю.П. Сухоруков, Н.Н. Лошкарева, Е.В. Мостовщикова	207
История лаборатории нанокompозитных мультиферроиков, А.П. Носов, В.Б. Выходец, В.Л. Арбузов, С.Е. Данилов, А.П. Дружков	227
История лаборатории низких температур, В.П. Дякина, В.В. Марченков	253
История лаборатории углеродных наноматериалов, А.Б. Ринкевич, А.Б. Владимиров, В.Н. Неверов	275
История лаборатории электрических явлений, В.В. Устинов, Л.Н. Ромашев	301
ОТДЕЛ неразрушающего контроля	315
История лаборатории дефектоскопии, А.С. Шлеенков	319
История лаборатории комплексных методов контроля, Г.С. Корзунин, В.Н. Костин	339
История лаборатории магнитного структурного анализа, А.П. Ничипурук	347
История лаборатории терромагнитной обработки, В.И. Пудов	363

ОТДЕЛ прецизионной металлургии и технологий обработки давлением ...	383
История лаборатории прецизионных сплавов и интерметаллидов, Ю.Н. Акшенцев, М.В. Дегтярев, В.О. Есин	389
История лаборатории прочности, Б.И. Каменецкий, Л.И. Яковенкова, А.Ю. Волков	425
История лаборатории физики высоких давлений, В.П. Пилюгин	443
ОТДЕЛ радиационной физики и нейтронной спектроскопии	449
История отдела радиационной физики и нейтронной спектроскопии, В.И. Бобровский, Б.Н. Гощицкий, В.Д. Пархоменко, Ю.Н. Скрыбин	455
ОТДЕЛ теоретической и математической физики	479
История лаборатории квантовой теории конденсированного состо- яния, В.Ю. Ирхин	483
История лаборатории теоретической физики, В.В. Меньшенин	497
История лаборатории теории нелинейных явлений, А.Б. Борисов, В.В. Киселев, А.Г. Шагалов	519
ОТДЕЛ электронных свойств	543
История лаборатории оптики металлов, В.И. Анисимов, М.М. Кирил- лова	547
История лаборатории полупроводников и полуметаллов, Ю.Г. Ара- пов, С.В. Гудина, И.В. Жевстовских, А.Т. Лончаков, В.И. Окулов, Т.П. Сур- кова, Г.И. Харус, Т.Б. Чарикова, Н.Г. Шелушнина, М.В. Якунин	569
История лаборатории рентгеновской спектроскопии, Э.З. Курмаев, Л.Д. Финкельштейн, М.А. Коротин	593

ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ НА УРАЛЕ

История научных направлений
Института физики металлов

Рекомендовано к изданию учёным советом
Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН

Технический редактор: М.В. Дегтярев

Подготовка архивных материалов: В.П. Спирина

Корректоры: Н.Н. Юнцевич, А.Л. Горбунова, Л.А. Гришагина, М.М. Насрыева, Г.А. Сарварова,
О.Е. Сдобнова, Н.С. Филиппова, И.Ю. Арапова, Н.М. Лядова, Т.И. Налобина

Дизайн и компьютерная вёрстка: П.А. Агзамова

Иллюстрация на обложке: А.Ф. Агзамов

Фотографии: С.Г. Новиков, В.В. Арашкевич, Р.В. Поморцев

и из личных архивов сотрудников Института

Подписано в печать 01.09.17. Формат 72x104 1/16. Бумага мелованная.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 53,52. Тираж 650 экз. Заказ № 2828

Оригинал-макет изготовлен в ИФМ УрО РАН
620990, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

Типография ООО «Адекс-принт».
620137, Екатеринбург, пер. Парковый, 14.

ISBN 978-5-903359-12-7



9 785903 359127