

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»

*Посвящается 85-летию  
Сибирского государственного  
индустриального университета*

**Научные школы СибГИУ**

**ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ  
В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Новокузнецк  
2014

УДК 517.9: 539.4: 537.29: 669.04: 669.12

ББК 22.3

П78

П78 Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий : научно-справочное издание / В.Е. Громов; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – 133 с.

ISBN 978-5-7806-0410-5

Собраны материалы, посвященные становлению и развитию научной школы кафедры физики имени профессора В.М. Финкеля за последние 25 лет. Подвергнуты анализу основные направления научной деятельности школы: электростимулированная пластичность металлов и сплавов, электровзрывное легирование поверхности, усталостная долговечность после электронно-пучковой обработки, влияние слабых электрических и магнитных полей, моделирование внешних энергетических воздействий и др. Приведены библиографические данные по каждому направлению и защищенным кандидатским и докторским диссертациям. Рассмотрены перспективы развития существующих и новых направлений школы.

УДК 517.9: 539.4: 537.29: 669.04: 669.12

ББК 22.3

**ISBN 978-5-7806-0410-5**

©Сибирский государственный  
индустриальный университет, 2014  
© Громов В.Е., 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНАЯ ШКОЛА «ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ».....	4
С ЧЕГО ВСЁ НАЧИНАЛОСЬ. ИСТОРИЯ В ЛИЦАХ.....	6
Глава 1. ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ: СТАНОВЛЕНИЕ, ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА, ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, МЕХАНИЗМЫ .....	16
Глава 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ.....	35
Глава 3. СЛАБЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ: ИСТОКИ, ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И СТАНОВЛЕНИЯ.....	50
Глава 4. ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ .....	65
Глава 5. УСТАЛОСТНАЯ ВЫНОСЛИВОСТЬ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ.....	74
Глава 6. СВЯЗЬ НАУКИ С ПРОИЗВОДСТВОМ.....	78
Глава 7. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, ФАЗОВОГО СОСТАВА И ДЕФЕКТНОЙ СУБСТРУКТУРЫ В ОБЪЕМНО И ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ЗАКАЛЕННЫХ РЕЛЬСАХ.....	87
Глава 8. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ И ПОВЕДЕНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ СТРУКТУР.....	93
Глава 9. ВОСПОМИНАНИЯ О ПОДНЕБЕСНОЙ. ШАГ В БУДУЩЕЕ.....	103
Глава 10. С ПРИЦЕЛОМ НА БУДУЩЕЕ.....	109
ВЕДУЩИЕ УЧЕНЫЕ ШКОЛЫ В E-LIBRARY.RU НА 1.04.2014.....	125
НАУЧНОЕ ОТКРЫТИЕ.....	126
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	127

## НАУЧНАЯ ШКОЛА «ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ»

*Во всем виноват Эйнштейн. В 1905 году  
Он заявил, что абсолютного покоя нет,  
И с тех пор его действительно нет  
(С. Ликок)*

Занятия наукой – это не тяжкий грех и способ интеллигентного зарабатывания денег, а увлекательный процесс, требующий полной самоотдачи. Наука позволяет понять мир, дарит новые яркие впечатления, друзей. По выражению Нобелевского лауреата П.Л. Капицы: «Наука должна быть веселая, увлекательная и простая. Таковыми же должны быть и ученые». Утверждение насколько спорно, настолько и привлекательно.

Создание научных школ – хорошая российская традиция, которая явилась следствием особенностей культурно-исторического развития России. В.И. Вернадский писал: «В России начало научной работе было положено правительством Петра, исходившего из глубокого понимания государственной пользы. Но эта работа быстро нашла себе почву в общественном сознании и не прерывалась в те долгие десятилетия, когда иссякла государственная поддержка научного творчества... она создавалась при этом интеллигенцией страны... создавалась их личным усилием, по личной инициативе или путем образуемых ими организаций...».

**Научная школа** – оформленная система научных взглядов, а также научное сообщество, придерживающееся этих взглядов. Научная школа образует ту динамическую единицу науки, которая обеспечивает преемственность научного знания и создает оптимальные условия для его развития. Она может формироваться неформально или в рамках институциональных единиц – академических кафедр учебных заведений, отделов научно-исследовательских организаций, профессиональных объединений ученых.

История каждой школы неповторима, как и биография ее основателя, и в науке отличается одной лишь ей присущими свойствами. Она объединяет ученых, которые принимают выдвинутую лидером научную идею или теорию в качестве парадигмы, а предложенный им метод – как способ решения научных проблем. Эта идея (или теория) и развивается в исследовательскую программу, которая дает опорные точки, позволяет увидеть в определенном ракурсе объект исследования, перспективу анализа научной проблемы.

Перспективы науки всегда определялись перспективами научных школ. Особенно это характерно для нынешнего XXI столетия, когда все отрасли мировой науки достигли выдающихся высот, когда любые научные задачи и проблемы требуют объединения усилий ученых, зачастую различных отраслей науки, образования коллективов ученых. Но эти достижения являются выдающимися по от-

ношению к прошлому, а по отношению к будущему это старт для новых достижений. В этом отношении научная школа – уникальное образование, в котором обеспечивается непрерывность научного процесса, происходит развитие научного знания на базе достигнутого с четко вырисованной перспективой.

Несколько научных школ могут одновременно решать одни и те же научные задачи, однако при этом различаться в теоретических основах (принципах) и практических подходах к их решению, программах, методах и инструментах. Этим объясняется и разнообразие результатов, достигнутых учеными разных стран.

Опираясь на мемуары ученых-физиков, можно выделить характерные черты научной школы в физике:

- наличие научного лидера исследовательского коллектива, руководителя школы;
- стиль работы и стиль мышления;
- научная идеология, определенная научная и научно-исследовательская концепции, особая научная атмосфера;
- высокая квалификация исследователей, группирующихся вокруг лидера;
- значимость полученных ими результатов, высокий научный авторитет в области физики.

Наиболее значимые направления научных исследований на кафедре физики Сибирского государственного индустриального университета за последние 60 лет связаны с именами В.М. Финкеля, Л.Б. Зуева, В.Е. Громова.

## С ЧЕГО ВСЁ НАЧИНАЛОСЬ. ИСТОРИЯ В ЛИЦАХ

### Виктор Моисеевич Финкель



*В.М. Финкель*

Корифей научной школы

*Быть может, эти электроны –  
Миры, где пять материков,  
Искусства, знания, войны, троны,  
И память сорока веков!  
(В. Брюсов)*

Родился в 1930 году в г. Харькове. Окончив с отличием инженерно-физический факультет Харьковского политехнического института, приезжает по распределению на работу в Кузбасс. Специальность – инженер-металлофизик.

1953–1956 гг. Работа в ЦЗЛ КМК инженером-исследователем.

1956 г. Защита кандидатской диссертации.

1959 г. Утвержден ВАКом в ученом звании доцента.

1963–1969 гг. Заведующий кафедрой физики.

1966 г. Защита докторской диссертации.

1969 г. Работа в Тамбовском институте химического машиностроения.

Начало 90-х годов. Эмигрировал в США.

Основные научные интересы связаны с различными аспектами прочности и разрушения материалов, их правильного понимания и описания.

Исследованием процессов разрушения кристаллов, сталей и сплавов занималась группа инженеров проблемной лаборатории. В ней имелось необходимое оборудование для рентгеноскопического, электронномикроскопического и оптического исследований. И, что особенно важно, имелось свободное место для проведения опытов и размещения необходимого для исследований оборудования. Создаваемые экспериментальные устройства соответствовали поставленным задачам по изучению процессов разрушения материалов. К ним относятся исследования формирования и развития дислокационной структуры модельных материалов-кристаллов LiF и NaCl и двойникового на различных стадиях деформирования материала и его разрушения. В дальнейшем такие задачи просматривались на металлических кристаллах, которые либо выращивались вытяжкой из расплава как в случаях Zn и Bi, либо получались в результате рекристаллизации промышленных материалов и сплавов (кремнистое железо) в трансформаторной стали.

Методом фотоупругости исследовались распределения напряжения в местах остановки трещин как в макроскопических образцах (оргстекло), так и в тонких слоях (покрытиях), наносимых на поверхность металлических образцов.

Процесс разрушения протекает очень быстро, и для разворачивания его во времени, использовались скоростные камеры фоторегистрации и слежения (СКС, СФР), и создавались необходимые устройства импульсного освещения для фотосъемки. Это только отдельный фрагмент исследований. А их было много. Это и шиферный излом, и волновые процессы, сопровождающие разрушение, (включая и электромагнитное излучение), и сама поверхность, вскрывавшаяся при этом. Эти задачи решал коллектив сотрудников, возглавляемый В.М. Финкелем. Таким образом, возникла школа. Сам руководитель являлся поставщиком оригинальных идей, некоторые из которых казались фантастическими. Его идея обработки поверхности плазменными сгустками получила большое развитие, и в настоящее время является доминирующим научным направлением кафедры физики.

В.М. Финкель: «В 1962 году в аспирантуру ко мне поступил Лев Борисович Зуев – безусловно, самый талантливый мой ученик. Дело в том, что всё, что происходило в развитии и формировании Льва Борисовича как ученого и педагога, всегда базировалось на высочайшем интеллектуальном уровне. Лев Борисович из семьи книжечеев, где все читали всё. И общение с этим интеллигентным человеком для меня всегда было приятным. После защиты диссертации Лев Борисович начал развивать собственное научное направление, иными словами начал строить собственную научную жизнь. И я решил, что унаследовать кафедру должен Л.Б. Зуев. Потому что у него высокий потенциал и безусловная и явная научная перспектива. У него было знание материала, высокий интеллект, прекрасная дикция, чудесный гулкий голос и все остальные параметры хорошего лектора. И после моего отъезда был назначен Л.Б. Зуев!».

**Диссертации, защищенные в СМИ под  
руководством В.М. Финкеля**

Год	Ф.И.О.	Тема диссертации
1966	В.Н. Березовский	О некоторых явлениях при упругой деформации кремнистого железа.
1966	И.А. Куткин	Экспериментальное изучение кинетики и энергоёмкости разрушения сталей.
1967	В.А. Зрайченко	Об особенностях разрушения некоторых металлов.
1967	Л.Б. Зуев	Экспериментальное исследование заключительной стадии разрушения твердых тел.
1967	З.А. Масловская	Исследование передачи пластического сдвига сквозь границы в щелочно-галоидных кристаллах.
1967	А.М. Савельев	О пластической деформации при различных скоростях распространения трещины.
1969	И.Н. Воронов	Торможение быстрых трещин некоторыми структурными дефектами.
1969	В.Н. Гурарий	Прочность и разрушение кристаллов при импульсном воздействии сверхзвуковых плазменных струй.
1969	Р.Ф. Шарафутдинов	О возможности выявления дислокаций в ионных кристаллах конденсационным методом.
1970	И.С. Гузь	Экспериментальные исследования взаимодействия упругих волн с трещиной.
1973	П.С. Носарев	Упрочнение и разрушение углеродистых сталей при воздействии быстрых плазменных пучков

## Лев Борисович Зуев

*Грех, который тяготеет над физиками, –  
То, что они не могут утратить  
Своих знаний  
(Р. Оппенгеймер)*



*Л.Б. Зуев*

Родился в 1940 г. в г. Новокузнецке.

В 1962 г. окончил Сибирский металлургический институт по специальности «Металловедение и термическая обработка металлов», затем – аспирантуру под руководством В.М. Финкеля.

С 1965 г. Работа на кафедре физики в должности ассистента, старшего преподавателя, затем доцента.

1967 г. Защита кандидатской диссертации.

1969–1984 гг. Заведующий кафедрой физики.

1987 г. Защита докторской диссертации.

В настоящее время – д.ф.-м.н., профессор, заместитель директора ИФПМ СО РАН по научной работе в г. Томске.

После отъезда В.М. Финкеля в сентябре 1969 года Лев Борисович сменил его на посту заведующего кафедрой физики СМИ, на котором проработал пятнадцать лет. К моменту этой смены уже сложились научные интересы. Практически сразу после защиты кандидатской диссертации были начаты работы по исследованиям электрически заряженных дислокаций в щелочно-галоидных кристаллах (ЩГК). Привлекало то, что для ЩГК были хорошо отработаны методики наблюдения движения дислокаций с помощью метода ямок травления и введения в кристаллы дислокационных петель контролируемого типа и размера. Кроме того, в ЩГК было возможно использование метода фотоупругости для анализа деформаций и напряжений. И, наконец, можно было применять различные электрические измерения. Начиная работу, Лев Борисович отчетливо понимал, что для реализации этих идей нужен новый научный коллектив. Как обычно, кадровая проблема разрешилась благодаря обращению к молодежи. В научную группу в то время пришли принятые недавно на кафедру молодые выпускники кафедры физики металлов СМИ тех лет О.К. Царев, В.Е. Громов, В.И. Данилов, В.П. Сергеев, а также окончившие Новосибирский и Харьковский университеты В.А. Рыбьянец и В.Д. Мальцев. Кроме того, в этих работах приняли участие Н.К. Дорошенко и З.А. Масловская, принадлежавшие к старшему поколению сотрудников.

Все необходимые исследования не могли быть проведены только силами сотрудников. Огромная часть работы приходилась на долю студентов-дипломников кафедры физики металлов, которых в течение нескольких лет на ка-

факультете физики ежегодно было около двадцати человек. После проведения исследовательских дипломных работ многие из студентов оказывались авторами статей, опубликованных в научных журналах, а подавляющее большинство этих учеников именно так начали путь в науке.

Полное осуществление всех научных планов оказалось довольно сложным, поскольку аспирантура в СМФИ, а тем более на кафедре физики в те годы фактически отсутствовала, и все основные исполнители исследований работали преподавателями и старшими лаборантами. Это фактически позволяло заниматься научной деятельностью только в выходные дни, вечерами, в периоды экзаменационных сессий. Положение изменилось к лучшему только в 1976 году, когда стали выполняться научно-исследовательские работы по договорам с ВНИИ радиотехники (Москва, Минрадиопром). Поступавшее по этим договорам финансирование позволило создать на кафедре штат инженеров, занятых только научной работой, и получить средства для поездок на конференции и приобретения научного оборудования.

В эти же годы на кафедре появились и стали развиваться другие научные направления. Работы по одному из них были начаты еще В.М. Финкелем и В.Н. Гурарием, а после отъезда последнего в Австралию были продолжены П.С. Носаревым. История их возникновения такова. В статье В. Шерера «Сверхзвуковой ускоритель» была описана конструкция сравнительно простого ускорителя, позволяющего разгонять микрочастицы, образующиеся при электрическом взрыве фольги, до скоростей порядка первой космической. Вскоре была построена установка, на которой отработывались детали новой плазменно-капельной методики упрочнения и модификации поверхности металлов и сплавов.

В 1975 году на кафедру пришел к.х.н. Ф.И. Иванов, незадолго до этого защитивший кандидатскую диссертацию в Томском политехническом институте. По его инициативе были начаты исследования устойчивости и взрывного разложения нитевидных кристаллов азидов тяжелых металлов. Это новое направление вообрало в себя опыт выращивания и исследования структуры и свойств нитевидных кристаллов и опыт в химии твердого тела, приобретенный Ф.И. Ивановым в аспирантуре ГПИ под руководством профессора Ю.А. Захарова. Произошло идейное взаимообогащение, и эти работы в дальнейшем активно развивались на кафедре физики, приведя, в итоге, к защите Ф.И. Ивановым докторской диссертации на эту тему в 90-х годах.

Большим успехом было развитие на кафедре физики прикладных исследований. К началу 80-х годов в теоретическом и прикладном аспектах научное направление стало главным на кафедре, к этому времени договорное финансирование школы достигло примерно 300 тысяч рублей в год, что было большой суммой. Это давало возможность участия в большинстве научных конференций, проводившихся в стране, а также способствовало обеспечению достаточно высокого уровня исследований. Работы сотрудников докладывались на дислокационных конференциях в Харькове, конференциях по нитевидным кристаллам в Воронеже, по воздействию электрических полей на вещество в Кишиневе, по физике прочности и разрушения в Киеве. Статьи регулярно публиковались в журналах «Физика

твердого тела», «Кристаллография», «Поверхность», «Электронная обработка металлов», «Украинский физический журнал», «Известия вузов. Физика» и других. Стали появляться первые публикации в зарубежных физических журналах (*Physica Status Solidi*), возникли контакты с зарубежными учеными.

В начале 80-х только что защитивший кандидатскую диссертацию к.ф.-м.н. Виктор Евгеньевич Громов расширил исследования электропластического эффекта, распространив их на металлы. Он умело организовал эти работы и в 1994 году защитил докторскую диссертацию на эту тему в диссертационном совете ИФПМ СО РАН. Это интересное и важное в теоретическом и прикладном аспектах научное направление стало главным на кафедре.

## Виктор Евгеньевич Громов



*В.Е. Громов*

*Я только с теми, кто,  
Стеная, ищет истину  
(Б. Паскаль)*

Имя доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой физики СибГИУ, Заслуженного деятеля науки РФ, лауреата премии Правительства РФ в области науки и техники, лауреата премии РАН им. И.П. Бардина, действительного члена Российской академии естественных наук, действительного члена Международной академии энерго-информационных наук Виктора Евгеньевича Громова хорошо известно в научном мире.

Организаторский талант В.Е. Громова позволил ему создать на кафедре хорошую учебно-материальную и методическую базу, а также высококвалифицированный профессорско-преподавательский коллектив. В короткие сроки ему удалось сформировать и научный коллектив, объединивший сотрудников ряда кафедр СибГИУ, аспирантов, стажеров и специалистов-производственников предприятий Новокузнецка и Томска.

## Основные даты жизни и деятельности профессора В.Е. Громова

Виктор Евгеньевич Громов

родился 26 ноября 1947 года в г. Красноярске.

- 1966 г. Окончил среднюю школу.
- 1966–1971 гг. Студент Сибирского металлургического института (СМИ).
- 1971 г. С отличием окончил технологический факультет СМИ по специальности «Физика металлов».
- 1971–1980 гг. Старший лаборант, ассистент, ст. преподаватель кафедры физики СМИ.
- 1978 г. Защитил диссертацию на степень кандидата физико-математических наук.
- 1980 г. Доцент кафедры физики.
- 1983 г. Решением ВАК от 3 августа 1983 г. (протокол 31 д/1) присвоено ученое звание доцента.
- с 1988 г. по настоящее время Председатель Оргкомитета конференций «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий», «Градиентные структурно-фазовые состояния в сталях и сплавах».
- 1989–1992 гг. Докторант Государственного научного центра «Институт физики прочности и материаловедения СО РАН».
- 1992 г. Присуждена ученая степень доктора физико-математических наук за диссертацию «Закономерности электростимулированной пластичности металлов и сплавов».
- с 1993 г. по настоящее время Заведующий кафедрой физики СМИ (СибГГМА, СибГИУ).
- 1993 г. Награжден знаком «Отличник высшей школы».
- 1994 г. Решением Государственного комитета РФ по высшему образованию от 22 июня 1994 г. № 318-п присвоено ученое звание профессора.
- 1994 г. Избран действительным членом Международной академии мии энерго-информационных наук.
- 1995 г. Избран членом-корреспондентом Российской академии естественных наук.
- с 1995 г. по настоящее время Член Межгосударственного координационного совета по физике прочности и пластичности материалов.
- с 1996 г. по настоящее время Член редакционной коллегии журналов «Известия вузов. Черная металлургия», «Заготовительные производства в машиностроении», «Фундаментальные проблемы современного материаловедения», «Деформация и разрушение материалов», «Наноинженерия».

- 1998 г. Присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки ки Российской Федерации» (Указ Президента РФ № 1032 от 31.08.98). Избран действительным членом Российской Академии естественных наук.
- с 1999 г. по настоящее время Член 3-х специализированных докторских диссертационных советов при СибГИУ, АлтГТУ.
- 1999 г. Председатель кандидатского диссертационного Совета при СибГИУ.
- с 2002 г. по настоящее время Член совета РАН по физике конденсированных сред (отделение физики прочности и пластичности материалов).
- 2004 г. Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники.
- 2012 г. Включен в федеральный реестр экспертов научной технической сферы Минобразования и науки РФ.
- 2013 г. Лауреат премии РАН имени академика И.П. Бардина  
Соавтор научного открытия «Явление увеличения усталостной долговечности нержавеющей сталей электронно-пучковой обработкой».

Научная школа **«Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий»** ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», возглавляемая д.ф.-м.н., профессором В.Е. Громовым, хорошо известна в нашей стране и за рубежом. Под его руководством в последние годы экспериментальные исследования проводились, главным образом, по следующим научным направлениям:

- *фундаментальное*: физические механизмы прочности и пластичности металлов, сталей и сплавов при внешних электромагнитных воздействиях;
- *прикладное*: физическое материаловедение в современных технологиях обработки металлов давлением;
- *методическое*: аппаратное и методическое обеспечение фундаментальных и прикладных исследований.

Развитые представления о механизмах электростимулированной пластической деформации на разных структурных уровнях позволили объяснить изменения динамики дислокаций, эволюцию тонкой субструктуры, поверхностные и резонансные эффекты, напряженно-деформированное состояние материалов, волновой характер пластической деформации, мало- и многоцикловую усталость сталей и сплавов в этих условиях, что обеспечило разработку и внедрение физико-технических основ технологии промышленного электростимулированного волочения проволоки и повышение усталостного ресурса сталей разных структурных классов. Эти работы выполнялись и выполняются в соответствии с Координационным планом важнейших НИР по АН СССР на 1981–90 гг.; Координационным

планом НИР программы исследований «Повышение надежности систем “машина-человек-среда”» РАН на 1989–2000 гг.; грантами Госкомвуза и Министерства образования и науки по фундаментальным проблемам металлургии на 1994–2009 гг. и программой «Интеграция» (1998–2009 гг.), ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002–2006 гг.», АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» 2008–2011 гг., ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., Грантами РФФИ 2008–2013 гг., международными Грантами РФФИ-ГФЕН 2008–2013 гг.

Полученные результаты нашли применение как в академических, отраслевых и учебных институтах при изучении природы формоизменения металлов и сплавов, так и на ряде предприятий металлургической промышленности и машиностроения (ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», ОАО «КМЗ» и др.) при разработке соответствующих электротехнологий. Эти работы получили широкую известность как в России, так и за рубежом. Они внедрены со значительным экономическим эффектом на предприятиях Кузбасса. В результате многолетней активной исследовательской деятельности В.Е. Громов создал научную школу, в которой его ученики развивают соответствующие научные направления.

В последние годы исследовательские усилия междисциплинарного коллектива ряда кафедр (физики, механики, материаловеды, математики), возглавляемого В.Е. Громовым, сосредоточены на решении проблем разработки физических принципов новейших технологий обработки металлов.

Решены задачи оценки напряженно-деформированного состояния материала и эволюции субструктуры при волочении и холодной объемной штамповке, что позволило разработать основы технологии безкислотного удаления окалины; проведен комплекс исследований влияния легирования сталей азотом на механические и технологические свойства; установлены причины ухудшения свойств металлов пароперегревателей и паропроводов и предложены рекомендации по контролю состояния металла с помощью неразрушающих методов: разработаны перспективные способы и технологии повышения эксплуатационных характеристик рельсовой стали; реализована методика электростимулированного восстановления усталостного ресурса деталей; развиты принципы синергетики для электростимулированной пластичности, внедрена технология прокатки листовой стали в валках переменного сечения, установлены закономерности эволюции градиентных структурно-фазовых состояний при различных сложных видах деформации и обработки поверхностей потоками электронных пучков и плазмой. Установлена физическая природа влияния слабых электрических потенциалов, переменных и постоянных магнитных полей на пластическую деформацию металлов; разработаны физико-технические основы термомеханического упрочнения стальной арматуры и плазменного упрочнения валков; выявлены механизмы формирования наноразмерных фаз и упрочнения низкоуглеродистой стали при термомеханической обработке и чугуновых валков при плазменной обработке, установлены основные закономерности и природа формирования структурно-фазовых состояний поверх-

ностных слоев металлов и сплавов при одно- и двухкомпонентном электровзрывном легировании и последующей электронно-пучковой обработке, дана интерпретация научного открытия повышения усталостного ресурса нержавеющей сталей электронно-пучковой обработкой.

Результаты научных исследований В.Е. Громова систематически представляются научной общественности в виде докладов на международных, всероссийских конференциях, симпозиумах и семинарах. С 1988 г. является председателем оргкомитета 9 Всесоюзных и международных конференций «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий», «Градиентные структурно-фазовые состояния в сталях и сплавах» (Новокузнецк, Россия; Николаев, Украина), входил в состав оргкомитетов международных конференций «Действие электрических полей и токов на пластическую деформацию металлов» (Юрмала, Латвия 1987, 1990 гг.; Москва, Воронеж, Россия 1976–2008 гг.), «Актуальные проблемы прочности» (Киев, Украина; Витебск, Беларусь; Санкт-Петербург, Россия), «Физические свойства металлов и сплавов» (Екатеринбург, Россия).

Итоги формирования и развития В.Е. Громовым научных направлений и результаты исследований нашли отражение более чем в 2700 публикациях (в том числе 22 изобретениях и патентах РФ, 61 монографии в центральных издательствах, некоторые из которых рекомендованы УМО по металлургии Федерального агентства по образованию в качестве учебного пособия для студентов технических вузов страны; 25 статья в зарубежных физических журналах (США, Англии, Чехии, Китая и Германии).

Под редакцией В.Е. Громова в 1990–2013 гг. издано 18 тематических сборок и выпусков журналов «Известия ВУЗов. Черная металлургия», «Известия вузов. Физика», «Наноинженерия». В русле интенсивной работы научной школы В.Е. Громова активно осуществляется воспитание и подготовка научных кадров. Им подготовлены более 30 кандидатов наук и 8 докторов наук. Он проводит большую организаторскую деятельность по привлечению ведущих производственников к работе над диссертациями и постоянно оказывает им конкретную консультационную помощь.

## Глава 1. ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ:

**становление, теория и практика, физические основы, механизмы**

*Современная физика ставит своей задачей  
определить электрическую структуру всех  
встречающихся в природе веществ и вывести  
законы физических и химических явлений из  
основных законов взаимодействия электрических  
зарядов и из законов их движения  
(И. Тамм)*

Одним из самых распространенных методов обработки материалов для придания им нужной формы является пластическая деформация, которая практически осуществляется различными способами: прокатка, волочение, выдавливание, прессование, ковка и пр. В отличие от других методов механообработки, например, резания, пластическая деформация модифицирует структуру материала, значительно повышая ее качество. Однако в некоторых случаях пластическая деформация оказывается затруднительной или даже невозможной ввиду высокого сопротивления материала деформированию [1–2]. В таких случаях на помощь приходят специальные методы пластической деформации, основанные на дополнительном воздействии на материал, таком, что само по себе это воздействие не вызывает какой-либо значительной деформации, однако в условиях активного пластического деформирования приводит к существенному облегчению пластической деформации. Одним из таких методов, находящим уже сейчас широкое практическое применение, является дополнительное воздействие на материал (обязательно металлический) электрическим током плотностью до  $1000 \text{ А/мм}^2$ . Ясно, что если бы такой ток был постоянным, то металл почти немедленно испарился бы за счет выделения лент – джоулева тепла. Для избежания этого ток возбуждают очень короткими импульсами ( $\sim 100 \text{ мкс}$ ) с низкой частотой ( $\sim 1 \text{ Гц}$ ). Такой метод обработки был назван электропластической деформацией (ЭПД) [3–4]. ЭПД состоит из ряда физических эффектов, дающих примерно одинаковый вклад в результирующий эффект [5].

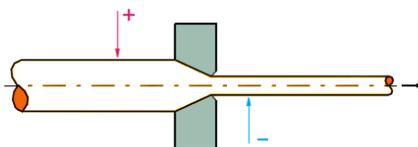
Силы взаимодействия между частицами в твердых телах имеют электромагнитную природу, причем величины положительных и отрицательных зарядов в теле в точности равны друг другу, что обеспечивает его макроскопическую электрическую нейтральность. Однако поскольку любой кристалл содержит дефекты разных типов, искажающие идеальную структуру, отдельные его микрообъемы не идентичны друг другу, и можно предположить, что строгое равновесие зарядов в локальной области вблизи дефекта не выполняется. В этом случае можно ожидать, что электрические поля в диэлектриках и электрические токи в проводниках будут оказывать действие на области кристалла, содержащие дефекты. Поскольку за пластичность ответственны именно дефекты, нетрудно прийти к выводу, что электрическое воздействие может эффективно менять характер пластического течения кристаллов [6].

По-видимому, первым описал такой эффект французский физик Дюфор в 1856 году. Он обнаружил, что прочность медной проволоки после пропускания электрического тока уменьшается, а железной – увеличивается. Это было первое указание на то, что действие электрического тока не сводится только к выделению джоулева тепла (закон Джоуля – Ленца) [6].

Идея управления механическим поведением твердых тел с помощью электрических полей очень заманчива и кажется сравнительно просто реализуемой. Этим объясняется большой интерес, проявленный исследователями к проблеме электропластического эффекта (ЭПЭ). В соответствии с реакцией твердых тел на электрические поля можно ожидать, что существуют две разновидности эффекта, характерные для диэлектриков и проводников [6].

подавляющее большинство металлов и сплавов используется на практике в пластически деформированном состоянии [6]. С физической точки зрения металл – это электронная жидкость, в которую погружены положительно заряженные ионы, образующие его кристаллическую решетку. Оказалось, что пропускание достаточно мощных импульсов электрического тока плотностью  $\sim 1 \text{ ГА/м}^2$  ( $10^9 \text{ А/м}^2$ ) позволяет существенно повлиять на динамику процесса пластической деформации [3–4]. Приведенная выше необходимая для реализации эффекта плотность электрического тока объясняет трудности его реализации: такую плотность тока можно создать только в сравнительно тонких проводниках с размерами поперечного сечения всего около нескольких квадратных миллиметров. Иначе может не хватить мощности электростанции!

Наиболее удобно использовать ЭПЭ в случае волочения проволоки [4]. Во-первых, проволока обычно имеет небольшое сечение, и сравнительно нетрудно обеспечить протекание тока достаточной плотности, а во-вторых, такой ток легко подать в очаг деформации (рисунок 1.1). Построенные для этих целей специальные генераторы электрических импульсов большой мощности были применены при волочении проволоки на Западно-Сибирском металлургическом комбинате (ныне ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»). Их применение дало большой и интересный эффект: прежде всего усилие, необходимое для протаскивания проволоки через фильеру, снизилось на 15–20%, сократилось число обрывов проволоки во время волочения, процесс стал более устойчивым. Но самое интересное состоит в том, что изменились механические свойства проволоки. На ее поверхности вместо твердого слоя, характерного для обычного процесса, образовался мягкий, проволока стала более пластичной [4].



*Рисунок 1.1. – Схема волочения проволоки с применением электрического поля*

Электрическое воздействие на твердые тела ни в коем случае не сводится только к их нагреву. Дефекты структуры, определяющие механические свойства

материалов, обладают электрическими зарядами и немедленно отзываются на приложение полей или протекание электрического тока. Это особенно существенно при малых размерах объектов, например в современных микроминиатюрных электронных устройствах. Они могут не только постепенно изменять свое состояние, но и вообще разрушаться при работе, которая состоит, собственно, в определенной реакции на действие электрического сигнала.

В 1987 г., один из основателей научного направления «Электропластическая деформация сталей и сплавов», профессор Л.Б. Зуев (доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики прочности Института физики прочности и материаловедения СО РАН) обобщил результаты исследований в области электрически заряженных дислокаций и влияния электрических полей на пластичность кристаллов в своей докторской диссертации «Поляризационные эффекты и элементарные акты пластичности в щелочно-галлоидных кристаллах».

Он объяснил природу электропластического эффекта (ЭПЭ) в щелочно-галлоидных кристаллах, показав, что в его основе лежат:

- высоковольтная поляризация, связанная с формированием объемного электрического заряда (слой Дебая – Хюккеля) на свободных и внутренних границах кристалла;

- ориентационная поляризация, обусловленная переориентацией диполей «двухвалентная примесь – катионная вакансия»;

- макромасштабное перемещение линейных электрически заряженных дефектов (дислокаций) в электрическом поле;

- новый эффект, названный «ядерным», поскольку, как установлено, он определяется диффузионным перераспределением заряженных ступеней в ядре дислокации [7, 8].

В 1975 г. В.Е. Громов (доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой физики имени профессора В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета) защитил кандидатскую диссертацию «О механизмах влияния электрического поля на подвижность дислокаций в щелочно-галлоидных кристаллах», в которой было установлено:

- электрическое поле снижает сопротивление пластической деформации кристаллов NaCl, а подвижность дислокаций возрастает с увеличением напряженности поля;

- подвижность краевых и винтовых дислокаций в кристаллах NaCl в области термически активированного движения зависит от ориентации электрического поля относительно действующей плоскости скольжения. Кроме того, результатом работы В.Е. Громова явилось создание установки для импульсного нагружения кристаллов механической нагрузкой регулируемой амплитуды и продолжительности, используемой при снятии зависимости скорости движения дислокаций от приложенного напряжения в широком диапазоне скоростей [9].

Позже, в 1992 г., В.Е. Громов защитил докторскую диссертацию «Закономерности электростимулированной пластичности металлов и сплавов» в диссер-

тационном совете Института физики прочности и материаловедения СО РАН. В ходе выполнения диссертационного исследования были развиты основы научного направления, заключающегося в систематическом и комплексном исследовании и использовании электростимулированной пластической деформации (ЭПД) на разных структурных уровнях, что позволило:

- выяснить природу явления токовых импульсов на микро-, мезо-, и макроуровне пластической деформации;
- определить механизмы, контролирующие поведение индивидуальных дислокаций, эволюцию дислокационной структуры и всего материала при токовом воздействии;
- разработать серию установок, методик и способов исследования электростимулированной пластической деформации на различных структурных уровнях [10].

В.Е. Громовым установлены основные механизмы, контролирующие ЭПД сталей различных структурных классов:

- для низкоуглеродистых и низколегированных сталей, где основным механизмом пластической деформации является скольжение, воздействие импульсов тока приводит к интенсивному формированию областей локализации деформации с ультрадисперсной структурой (каналов деформации) более высокой однородности фрагментированной структуры;

- для сталей аустенитного класса, где реализуется два механизма пластической деформации – скольжение и двойникование, воздействие токовых импульсов проявляется в совокупности факторов, приводящих к возрастанию роли деформации скольжением и уменьшению деформации двойникованием;

- воздействие токовых импульсов облегчает процесс волочения проволоки из сталей различных структурных классов; интенсификация процесса волочения при токовом воздействии достигается за счет стабилизации технологических режимов, увеличения степени обжатия, скорости деформации, сокращения их числа и устранения промежуточных отжигов [10].

Проблема изменения механических свойств металлов и сплавов под действием электрических полей и токов, ставшая предметом многочисленных исследований и открывавшая перспективы создания высокопроизводительных технологических процессов обработки металлов, привела к созданию нового электрооборудования и методического обеспечения для технологических процессов электростимулированной обработки металлов.



*В.А. Кузнецов*

В 1994 г. В.А. Кузнецов защитил кандидатскую диссертацию «Электротехнический комплекс установок и методического обеспечения процессов электростимулированной обработки металлов давлением» по специальности 05.09.03 Электрические комплексы и системы, включая их управление и регулирование. Автор, анализи-

руа ранние эксперименты, показавшие, что под воздействием тока механические свойства металлов улучшаются (снижается наклеп, происходит разупрочнение материала, залечивание дефектов в металлической структуре и т.д.) впервые:

- получил методики расчета параметров токового импульса, эквивалентного электрического сопротивления образца, напряженно-деформированного состояния, усилия при обработке металлов давлением и температуры вблизи зоны деформации;

- разработал установку для исследования электростимулированной пластической деформации (ЭПД) на разных структурных уровнях;

- показал, что системы автоуправления процессом электростимулированного волочения позволяют регулировать основные энергосиловые параметры обработки металлов давлением (усилие и температуру вблизи зоны деформации) [11].

Генератор токовых импульсов и система автоуправления частотой воспроизведения импульсов доведены до уровня опытно-промышленного образца, который прошел промышленные испытания и внедрен в метизном производстве ОАО



*Т.В. Ерилова*

«ЕВРАЗ ЗСМК», позже в обжимном, рельсобалочном и сортопрокатном цехах внедрены усовершенствованные системы регулирования скорости главных приводов прокатных станов «1100», «900», «360» и «280» НКМК.

В период с 1992 г. по 1998 г. исследование процессов электростимулированного волочения проволоки было продолжено Т.В. Ериловой, доцентом кафедры физики имени профессора В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета, кандидатом технических наук, которая в 1998 г. защитила кандидатскую диссертацию «Влияние импульсов электрического тока на свойства и структуру малоуглеродистых и низколегированных сталей» в диссертационном совете СибГИУ по специальности 05.16.01 Металловедение и термическая обработка металлов.

Для проволоки из сталей Ст2кп, 10 и 08Г2С:

- был предложен механизм влияния подачи импульсов тока на процесс волочения и было установлено, что снижение усилия волочения при импульсном электростимулированном волочении (ЭСВ) происходит за счет изменения напряженного состояния в узле деформирующей системы; возможными причинами (кроме выявленных другими исследователями пинч-эффекта, электронно-пластического эффекта, скин-эффекта, теплового воздействия) являются механические колебания проволоки, приводящие при частотах, близким к резонансным, к уменьшению трения в волоке и, соответственно, к снижению усилий волочения;

- в условиях ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» проведено экспериментальное волочение проволоки по технологическим маршрутам при токовом воздействии [12].

В рамках научного направления «ЭПД сталей и сплавов» в период с 1999 г. по 2004 г. интенсивно исследовалась усталость сталей и сплавов в условиях обработки импульсным электрическим током. Вскрыть физические механизмы и установить эффекты, сопровождающие процесс обработки сталей импульсным элек-

трическим током при усталости стало возможным благодаря применению современных методов структурных исследований материалов – оптическая, электронная дифракционная и сканирующая микроскопия, и интерпретации результатов их применения, интенсивно развиваемых в Томской научной школе под руководством профессора, д.ф.-м.н. Э.В. Козлова (заведующий кафедрой физики Томского государственного архитектурно-строительного университета) и Заслуженного деятеля науки РФ, профессора, д.ф.-м.н. Н.А. Конева (профессор кафедры физики Томского государственного архитектурно-строительного университета).



*Н.А. Конева*

С научной школой Э.В. Козлова и Н.А. Конева связан самый длительный период тесного и плодотворного научного сотрудничества, благодаря которому в свет вышли ряд фундаментальных и прикладных научных публикаций [13–25].

В 1999 г. О.В. Соснин (доктор физико-математических наук, с.н.с. Сибирского государственного индустриального университета) защитил кандидатскую диссертацию на тему «Диагностика усталостного разрушения сталей и его подавление мощными импульсами электрического тока», в результате выполнения которой:

- была доказана применимость методики измерения скорости распространения ультразвука для обнаружения критической стадии усталостного разрушения, которая определяется по резкому снижению скорости распространения

ультразвука после длительного этапа постоянства и медленного ее падения [26];

- предложен способ предотвращения усталостного разрушения путем обработки деталей, вступивших в третью стадию разрушения, электрическими импульсами большой амплитуды, что способствовало возрастанию ресурса на 15–30 %;

- показано, что восстанавливающее ресурс действие электрических импульсов связано с релаксацией напряжений и (или) перекристаллизацией материала вблизи микродефектов типа усталостных микротрещин;

- предложен надежный способ диагностики наступления критической стадии эксплуатации индивидуального изделия и доказана возможность частичного восстановления ресурса изделий из сталей 40, 40Х, М76, Х18Н10Т и сварного соединения 40Х+Р6М5 путем их электроимпульсной обработки [27].



*О.В. Соснин  
(1974–2007 гг.)*



*В.В. Коваленко*

В 2001 г. В.В. Коваленко (доктор физико-математических наук, доцент кафедры физики имени профессора В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета) защищена кандидатская диссертация «Структурно-фазовые превращения в нержавеющей стали при электростимулированной малоцикловой усталости». В ходе ее выполнения была установлена физическая природа структурно-фазовых превращений в нержавеющей стали 08X18N10T и частичного восстановления ее ресурса в условиях стимуляции токовыми импульсами при малоцикловой усталости, а также проведены сравнительные исследования дефектной субструктуры

и фазового состава стали на макро-, мезо- и микроскопических структурно-масштабных уровнях деформации, а также вскрыты механизмы повышения усталостной прочности стали путем электростимулирования.

В работе показано, что:

- пластифицирующий эффект электростимулирования является многофакторным и заключается, во-первых, в протекании процессов измельчения крупных зерен аустенита и рассеяния их текстуры, во-вторых, в изменении кинетики самоорганизации дислокационной субструктуры, в-третьих, в инициировании распада твердого раствора с выделением частиц карбида титана и замедлением деформационного  $\gamma \rightarrow \epsilon$  превращения;

- эффект электропластификации способствует резкому уменьшению плотности возможных мест зарождения микротрещин в электростимулированной аустенитной стали и сдвигу разрушения к более высокому числу циклов нагружения [28].

Научные интересы молодых ученых кафедры физики имени профессора В.М. Финкеля в области исследования усталости при импульсной токовой обработке стальных изделий привели к идее рассмотрения не только малоцикловой усталости (как наиболее «жесткого» процесса изменения свойств сталей), но и многоцикловой усталости ответственных изделий, деталей и конструкций, а также поиска способов ее нивелирования.



*С.В. Коновалов*

В 2002 г. С.В. Коновалов (доктор технических наук, профессор кафедры физики имени профессора В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета) защитил кандидатскую диссертацию «Эволюция структурно-фазовых состояний аустенитной стали при усталости с импульсным токовым воздействием» в диссертационном совете Сибирского государственного индустриального университета по специальности 01.04.07 Физика конденсированного состояния. Им проведены исследования эволюции тонкой и зеренной структуры и фазового состава аустенитной стали 45Г17ЮЗ при усталости с элек-

тростимулированием для установления физической природы и механизмов увеличения ее усталостной прочности. В ходе проведения исследований установлено, что:

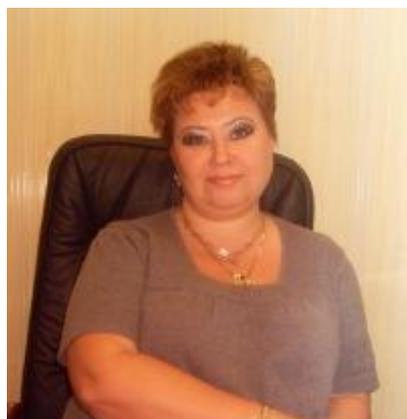
- усталостные испытания стали 45Г17ЮЗ, имеющей высокий уровень твердорастворного упрочнения, приводят к формированию вместо венной дислокационной субструктуры анизотропных фрагментов, вследствие чего превращения в дислокационной субструктуре происходят по схеме: дислокационный хаос → сетчатая +  $\epsilon$ -мартенсит → фрагментированная +  $\epsilon$ -мартенсит;

- одним из механизмов разрушения стали является мартенситное  $\gamma \rightarrow \epsilon$  превращение с последующим формированием высокоэнергетических межфазных границ раздела, на которых, впоследствии, зарождаются микротрещины, перерастающие в магистральную трещину; причиной мартенситного  $\gamma \rightarrow \epsilon$  превращения являются дальнедействующие поля напряжений, локализованные в сетчатой дислокационной субструктуре, источником которых является несовместность деформации соседних зерен и их групп, а также  $\gamma$ - и  $\epsilon$ -фазы;

- эффект токового воздействия носит многофакторный характер и реализуется на разных структурных уровнях; в материале протекают процессы рекристаллизации и возврата и несколько типов релаксационных процессов: перестройка зеренной структуры путем зарождения и роста зерен вследствие развития локальной динамической рекристаллизации; аннигиляция дислокаций, которая приводит к фиксации в электростимулированном материале хаотической дислокационной субструктуры, отсутствовавшей в циклированной стали; частичная перестройка дислокационной субструктуры – снижение объемной доли сетчатой и увеличение доли фрагментированной субструктур, и, наконец, – образование большого числа микродвойников;

- на мезоуровне при электростимулировании релаксируют и залечиваются концентраторы напряжения (дислокационные скопления, стыковые дисклинации, уступы на границах зерен и т.п.), в результате чего среднее значение амплитуды кривизны-кручения убывает, и поэтому процессы зарождения и особенно развития трещин отодвигаются к более высокому значению числа циклов нагружения;

- электростимулирование сопровождается изменением электронной структуры твердого раствора и его концентрационного состава, что обусловлено изменением состояния твердого раствора стали и связано с разрушением микрочастиц алюминия, присутствующих в структуре исходной стали, движущимися полными дислокациями, двойническими дислокациями и дислокациями  $\gamma \rightarrow \epsilon$  превращения; наряду с полями напряжений изменения в электронной структуре являются еще одним фактором повышения пластичности материала [29].



*Е.Ю. Сучкова*

Позднее, в 2004 г. соискателем Е.Ю. Сучковой (кандидат технических наук, доцент) была защищена кандидатская диссертация «Закономерности эволюции структуры и фазового состава закаленной углеродистой стали при электростимулированной усталости».

сти» в диссертационном совете Сибирского государственного индустриального университета по специальности 01.04.07 Физика конденсированного состояния.

Впервые для предварительно закаленной стали 60ГС2 была установлена физическая природа структурных и фазовых превращений и частичного восстановления ресурса ее работоспособности в условиях стимуляции импульсным электрическим током при многоциклового усталости. В работе были установлены следующие экспериментальные факты:

- при обеих схемах испытаний исследуемой стали (с электростимулированием и без него) усталостное нагружение приводит к формированию градиентной структуры как в зоне усталостного роста трещины, так и в зоне долома;

- усталостные испытания инициируют протекание начальной стадии динамической рекристаллизации, сопровождающейся расслоением стали по углероду и частицам карбидной фазы с образованием областей с относительно высокой объемной долей частиц цементита, а также областей с высокой амплитудой кривизны-кручения кристаллической решетки, расположенных в стыках центров рекристаллизации;

- одной из причин разрушения стали при усталостных испытаниях в схеме непрерывного нагружения является мартенситная структура, формирующаяся при обратном  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$  превращении областей, расположенных в стыках зерен рекристаллизации и обогащенных углеродом;

- усталостное разрушение стали, подвергнутой на промежуточной стадии испытаний электростимулированию, сопровождается повсеместным обратным  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$  превращением с образованием кристаллов мартенсита;

- факторами, пластифицирующими сталь при электростимулировании и способствующими повышению ресурса усталостной долговечности материала, являются: релаксация упругих полей напряжений, формирующихся в стыках зерен и субзерен, содержащих большое количество частиц второй фазы, осуществляемая в результате обратного  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$  превращения; снижение скалярной плотности дислокаций в кристаллах мартенсита, субзернах и зернах; уход атомов уг-

лерода с дислокаций и кристаллической решетки  $\alpha$ -фазы с образованием частиц карбидной фазы [30].

В том же 2004 г., в результате исследования стали 60ГС2 в условиях многоциклового усталости с промежуточным токовым воздействием, В.В. Целлермаер (кандидат технических наук) в диссертационном совете Сибирского государственного индустриального университета по специальности 01.04.07 Физика конденсированного состояния защитил кандидатскую диссертацию «Структурно-фазовые превращения в феррито-перлитной стали при ус-



*В.Я. Целлермаер*

талости с импульсным токовым воздействием». Ранее, в 1993 г. В.Я. Целлермаер (доктор технических наук, профессор Сибирского государственного индустриального университета) исследовал структуру и свойства сталей феррито-перлитного (а также аустенитного) классов в своей кандидатской работе «Особенности структуры сталей феррито-перлитного и аустенитного классов после электростимулированной деформации» [31]. Однако работа на этом не прекратилась, поскольку оставалось много вопросов физической природы и закономерностей формирования структуры и свойств сталей после стимулирования электрическими токовыми импульсами. В диссертации В.В. Целлермаера было показано следующее:

- изменения структуры стали, связанные с усталостным нагружением, протекают, прежде всего, в приграничных областях зерен и сопровождаются разрушением перлитных колоний, развитием локальных рекристаллизационных процессов, формированием микропор и микротрещин и, в конечном счете, образованием магистральной трещины, раскрытие которой приводит к разрушению образца;

- поверхность разрушения стали 60ГС2, подвергнутой усталостным испытаниям, имеет сложное строение и состоит из зоны усталостного роста трещины, зоны долома и разделяющего их слоя ускоренного роста трещины; разрушение материала в зоне усталостного роста трещины осуществляется в основном по вязкому механизму; в зоне долома выявляются участки хрупкого скола, количество которых увеличивается по мере удаления от зоны усталостного роста трещины;

- субструктура, формирующаяся в стали в результате электростимулирования на промежуточной стадии усталостного нагружения, является весьма устойчивой к деформированию материала в условиях усталостных испытаний; одним из факторов повышения ресурса работоспособности стали при электростимулировании является подавление формирования дислокационной ячеистой субструктуры;

- электростимулирование стали 60ГС2 в условиях усталостного нагружения сопровождается повышением сопротивляемости материала распространению усталостной трещины, что выражается в релаксации концентраторов напряжения, увеличении критической длины трещины, уменьшении шага усталостного роста трещины и повышении коэффициента безопасности, снижении скорости роста усталостной трещины в промежуточной зоне;

- величина шага усталостной трещины в электростимулированном образце заметно меньше (~ 2 раза), чем в исходном, следовательно, электростимулированный материал обладает заметно более высокой сопротивляемостью распространению усталостной трещины [32].

Разработанное д.ф.-м.н., профессором Э.В. Козловым новое научное направление «Градиентные структурно-фазовые состояния в сталях и сплавах» [14, 20, 24] позволило сформировать новый взгляд на проблему усталости сталей и сплавов в условиях обработки импульсным электрическим током. В рамках этого



*М.П. Иваخين*

научного направления в 2005 г. М.П. Иваخينым (кандидат технических наук, доцент) была защищена кандидатская диссертация «Формирование градиентных структурно-фазовых состояний в аустенитных и мартенситных сталях при усталости и импульсном токовом воздействии» в диссертационном совете СибГИУ по специальности 01.04.07 Физика конденсированного состояния [33].

В ней впервые на сталях аустенитного и мартенситного классов (08X18H10T и 60ГС2) методами современного физического материаловедения проведен анализ усталостно-индуцированного градиента дефектной субструктуры и фазового состава, формирующегося в условиях нагружения по непрерывной схеме и с промежуточным импульсным токовым воздействием. В частности, в процессе проведения исследований выявлено следующее:

- воздействие импульсным электрическим током на сталь, прошедшую усталостные испытания, сопровождается изменениями зеренной и внутризеренной структур, карбидной подсистемы материала, которые заключаются, во-первых, в уменьшении средних размеров зерен, во-вторых, в увеличении скалярной плотности дислокаций, в-третьих, в перестройке дислокационной субструктуры путем замещения дислокационного хаоса «упорядоченным» типом дислокационной субструктуры, в-четвертых, в коагуляции частиц карбидной фазы, в-пятых, в растворении частиц, расположенных в матрице и повторном выделении их вдоль внутрифазных границ в виде тонких прослоек, в-шестых, в залечивании микротрещин, сформировавшихся в усталостно-нагруженном материале вдоль межфазных границ раздела карбид / матрица и, наконец, в-седьмых, в существенной релаксации дальнедействующих полей напряжения;

- многоцикловые усталостные испытания стали 08X18H10T, выполненные по непрерывной схеме и в условиях промежуточного токового воздействия, приводят к формированию структуры, параметры которой закономерным образом изменяются по мере удаления от лицевой поверхности образца, что указывает на формирование градиентной структуры, индуцированной в аустенитной стали многоцикловыми усталостными нагружениями и токовым воздействием.

- усталостные испытания стали 60ГС2, находящейся в закаленном состоянии, сопровождаются закономерным изменением дефектной субструктуры кристаллов мартенсита и карбидной подсистемы материала по мере удаления от зоны разрушения образца, что свидетельствует о формировании усталостно-индуцированного структурно-фазового градиента.

- токовая обработка стали 60ГС2, сопровождающаяся релаксацией дефектной субструктуры и коагуляцией частиц карбидной фазы, способствует увеличению объема материала, вовлекаемого в процесс деформирования при последующем усталостном нагружении образца [31].

Реализующийся во времени процесс накопления усталостных повреждений и эволюции дислокационных субструктур наводит на очевидную мысль, что усталостная долговечность и живучесть изделий может быть увеличена за счет различных внешних воздействий. Логическим завершением цикла исследований на кафедре физики имени профессора В.М. Финкеля в области влияния импульсов электрического тока на структурно-фазовое состояние и свойства сталей различных структурных классов, химического состава и назначения стала докторская диссертация на тему «Эволюция структурно-фазовых состояний в сталях при усталости и механизмы токового импульсного воздействия», защищенная О.В. Сошниным в диссертационном совете Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова в 2004 г. по двум специальностям: 01.04.07 Физика конденсированного состояния и 05.16.01 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов. В ней впервые была установлена физическая природа эволюции дислокационных субструктур и структурно-фазовых превращений и разрушения сталей различных структурных классов и частичного восстановления их ресурса в условиях стимулирования токовыми импульсами при усталости, а также решение частных задач позволило:

- доказать применимость методики измерения скорости распространения ультразвука для обнаружения критической стадии усталостного разрушения;

- обнаружить наступление критической стадии по началу резкого снижения скорости распространения ультразвука после длительного этапа постоянства или медленного падения скорости ультразвука;

- предложить способ предотвращения усталостного разрушения путем обработки деталей, вступивших в третью стадию разрушения, электрическими токовыми импульсами большой амплитуды, что сопровождается возрастанием усталостного ресурса сталей различных структурных классов (стали 40, 45Х, 45, 70ХГСА, 45Г17Ю3, 08Х18Н10Т, 60ГС2) и сварных соединений 40Х+Р6М5 на 15...70 %;

- установить, что эффект восстановления усталостного ресурса носит многофакторный, комплексный характер и вся совокупность установленных микромеханизмов токового воздействия, пластифицируя стали, резко уменьшает плотность возможных мест зарождения микротрещин, затрудняет их развитие, сдвигая разрушение к более высокому числу циклов нагружения;

- установить, что основными микромеханизмами электропластификации при усталостном малоцикловом нагружении аустенитной стали 08Х18Н10Т являются: протекание процессов собирательной рекристаллизации субструктур, подавление мартенситного  $\gamma \rightarrow \epsilon$  деформационного превращения, инициирование распада твердого раствора с выделением частиц  $Ti$ , развитие вторичного скольжения при уменьшении амплитуды внутренних полей напряжений, изменение кинетики самоорганизации дислокационной субструктуры, развитие дефектной субструктуры вследствие деформации превращения и возврата;

- показать, что при многоцикловом усталостном нагружении аустенитной

стали 45Г17Ю3 действие на сталь импульсного электрического тока приводит к протеканию нескольких типов релаксационных процессов: на микро- и мезоуровне – снижение скалярной плотности дислокаций и значительное увеличение амплитуды кривизны-кручения кристаллической решетки, перестройка зеренной структуры путем зарождения и роста зерен вследствие развития локальной динамической рекристаллизации; аннигиляция дислокаций, которая приводит к фиксации в электростимулированном материале хаотической дислокационной субструктуры, отсутствовавшей в циклированной стали; частичная перестройка дислокационной субструктуры – снижение объемной доли сетчатой и увеличение доли фрагментированной субструктур, и, наконец, – образование большого числа микродвойников;

- выяснить, что электростимулирование стали 45Г17Ю3 инициирует протекание процессов возврата и рекристаллизации, способствующих возникновению и перераспределению дальнедействующих полей напряжений, укрупнению зерен, увеличению угла рассеяния вектора структурной текстуры;

- установить, что в зоне усталостного роста трещины токовое импульсное воздействие на сталь 60ГС2 приводит: во-первых, к растворению исходных и повторному выделению новых частиц карбидной фазы и образованию глобулярного перлита; во-вторых, к увеличению скалярной плотности дислокаций и, в-третьих, к формированию дальнедействующих полей напряжений, источниками которых являются границы и стыки границ зерен, созданию полей напряжений в частицах глобулярного цементита и их релаксации;

- выявить факт повышения усталостного ресурса закаленной стали 60ГС2 со структурой пакетного и пластинчатого мартенсита в условиях токового воздействия, обусловленный: релаксацией упругих полей напряжений, формирующихся в стыках зерен и субзерен, содержащих большое количество частиц второй фазы, осуществляемый в результате обратного  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$  превращения; снижением скалярной плотности дислокаций в кристаллах мартенсита, субзернах и зернах; уходом атомов углерода с дислокаций и кристаллической решетки  $\alpha$ -фазы с образованием частиц карбидной фазы;

- предложить модель формирования «белого» слоя сталей различных структурных классов вблизи усталостных микротрещин, возникающего при особых «жестких» режимах токового воздействия. Установлена связь между материальными аспектами усталостных испытаний и положениями теории надежности и физики отказов [34].

В 2012 г. в рамках концепции «Градиентные структурно-фазовые состояния в сталях и сплавах» [14, 20, 24] В.В. Коваленко защитил докторскую диссертацию «Градиентные структурно-фазовые состояния в сталях: способы формирования, масштабы реализации, закономерности» в диссертационном совете Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова в 2004 г. по специальности 01.04.07 Физика конденсированного состояния, в которой наряду с другими решена задача, связанная с выявлением градиента структурно-фазовых

характеристик и установлением закономерностей и механизмов формирования и эволюции зеренной и субзеренной структур, инициированных процессами многоциклового (сталь 08X18H10T и сталь 60ГС2) и малоциклового (сталь 08X18H10T) усталости, а также процессами усталости с импульсным токовым воздействием.

В ней установлено, что:

- многоциклового и малоциклового усталостные испытания аустенитной стали 08X18H10T сопровождаются формированием в материале градиентной структуры объемно-поверхностного типа, выявленной на мезо-, микро- и наномасштабном уровнях и характеризующейся закономерными изменениями с увеличением расстояния до плоскости максимального нагружения (поверхности разрушения) средних продольных и поперечных размеров зерен, коэффициента их анизотропии и угла рассеяния вектора структурной текстуры как в среднем по ансамблю зерен, так и для каждого из выявленных классов зерен: высокоанизотропных, среднеанизотропных и изотропных;

- в сталях формируется непрерывный градиент дальнедействующих полей напряжений, выражающийся в снижении их величины по мере удаления от источника кривизны-кручения кристаллической решетки либо упругого происхождения, возникающего при неоднородной деформации материала (стыки и границы зерен поликристаллов, дисперсные недеформируемые частицы, микротрещины), либо пластического происхождения, когда изгиб создается избыточной плотностью дислокаций [35].



*Встреча с корифеями томской физической науки  
Слева направо: доктора наук, профессора Ю.Ф. Иванов, Э.В. Козлов,  
Н.А. Конева, В.Е. Громов*



*Юбилей Э.В. Козлова*

*Слева направо: А.Н. Тюменцев, д.ф.-м.н., профессор, В.П. Сергеев, д.т.н.,  
В.В. Коваленко, д.ф.-м.н., доцент, Э.В. Козлов, д.ф.-м.н., профессор,  
В.Е. Панин, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, А.И. Потеекаев, д.ф.-м.н.,  
профессор, В.Е. Громов, д.ф.-м.н., профессор, Ю.П. Шаркеев, д.ф.-м.н.,  
профессор, в центре (нижний ряд) Л.Б. Зуев, д.ф.-м.н., профессор*



*О.В. Соснин в окружении оппонентов и научных руководителей  
Слева направо: доктора наук, профессора Л.Б. Зуев, В.Я. Целлермаер,  
А.М. Глезер, В.Е. Громов*



*Обсуждение научных результатов*

*Слева направо: Е.А. Будовских, д.т.н., доцент, Д.А. Романов, к.т.н.,  
Д.В. Загуляев к.т.н., Е.С. Ващук, к.т.н., С.В. Коновалов, д.т.н., доцент,  
В.Е. Громов, д.ф.-м.н., профессор*

И в 2013 г., обобщая накопленный опыт исследования закономерностей поведения сталей и сплавов в условиях внешних воздействий различной физической природы, С.В. Коновалов защитил докторскую диссертацию «Закономерности влияния электромагнитных полей и токов на пластичность металлов и сплавов» в диссертационном совете Сибирского государственного индустриального университета по специальности 01.04.07 Физика конденсированного состояния. В ней установлено, что модификация зеренной структуры и дефектной субструктуры аустенитной стали 45Г13ЮЗ при усталостных испытаниях и токовой импульсной обработке носит объемный характер и приводит к формированию градиентной структуры на макро-, мезо- и микромасштабном уровнях, а также способствует увеличению числа циклов до разрушения в 1,7 раза [36].

Одним из путей решения интенсификации технологических процессов, связанных с обработкой металлов, является использование токового импульсного воздействия. Стимулирование процесса пластической деформации мощными короткими импульсами тока нетермической величины, привлекает в последнее время исследователей в областях физического материаловедения и обработки металлов давлением. Выяснение механизмов макро- и микропластичности металлов при внешних токовых воздействиях является основой создания новых и совершен-

шенствования существующих технологий с целью повышения комплекса эксплуатационных свойств металлов [4].

Совокупность экспериментальных данных, представленных в [3–6,8–35], и результатов теоретического анализа показывает, что установление связей между макроскопическими свойствами твердого тела и соответствующими микропроцессами и, в конечном итоге, физической природы электростимулированной пластической деформации достигается только при тщательных исследованиях процесса деформирования на разных структурных уровнях.

Системный характер описания механизмов электростимулированной пластичности состоит в иерархическом построении (индивидуальные дислокации, скопления и ансамбли, субструктура, участок образца, образец в целом), которое учитывает движение, торможение, генерацию и эволюцию структурных составляющих уровней и позволяет избежать несогласованности в анализе различных сторон пластической деформации.

Классификационное деление на структурные нано-, микро-, мезо- и макроуровни деформации является до некоторой степени условным, точно так же, как и выбор масштаба в пределах уровней и структурных элементов, определяющих процесс пластической деформации на данном уровне [4].

На нано-, микроуровне, простирающемся от единиц до тысяч ангстрем [37–39], воздействие токовых импульсов увеличивает подвижность индивидуальных дислокаций в металлических монокристаллах [4].

При переходе по ступеням иерархии структурных уровней от отдельных дефектов к их группам и более сложным образованиям (мезоуровень, масштаб от десятых долей до десятков микрон) токовое воздействие приводит к эволюции субструктуры в материалах, в которых пластическая деформация реализуется только скольжением и двойникованием одновременно (группы дисклинаций, пластины и рейки мартенсита, зоны сдвига и системы скольжения) [4].

На макроуровне развития пластической деформации (доли миллиметров – сантиметры) воздействие токовых импульсов на вязкопластическую среду приводит к ее разупрочнению, причем, как следует из сопоставления данных эксперимента и модели, основными при этом будут микромеханизмы микроуровня пластической деформации [4].

Итак, явление, заключающееся в снижении сопротивления деформированию металлов под действием токовых импульсов, открытое в 60-е годы многосторонне изучено в научной школе «Прочность и пластичность металлов и сплавов в условиях внешних энергетических воздействий» в рамках научного направления «Электропластическая деформация сталей и сплавов». Электропластическая деформация (ЭПД) металлов представляет собой комплексное явление, включающее целый ряд физических эффектов из различных областей физики твердого тела, составляющих в совокупности самостоятельную систему представлений о силовом действии электрического тока на металл, нуждающуюся в последовательной всесторонней разработке.

В рамках электронной теории металлов построена микроскопическая теория динамического пинч-эффекта в металлах и проанализированы обусловленные им

эффекты механического воздействия на металл, в том числе полярного характера. С точки зрения эффективности влияния на электропластическую деформацию металлов проанализированы различные эффекты, приводящие к формированию в проводнике неоднородного температурного поля и соответствующих термоупругих напряжений при воздействии импульсным электрическим током: скин-эффект во время и после импульса тока, охлаждение в окружающей среде в одиночном импульсе и серии импульсов. Независимо от формы и длительности импульса во время его действия термоупругие напряжения такого же порядка, что и напряжения от пинч-эффекта, и существенно ослабевают после импульса. При определенных условиях охлаждение в среде в серии импульсов может приводить к термоупругим напряжениям, существенно превышающим указанный уровень.

В квантово-механическом подходе получено общее выражение для силы электрон-фононного увлечения дефектов, на основании которого проанализированы вклады фононного, электронного и электрон-фононного механизмов увлечения в силу, вызываемую потоком тепла и электрическим током. Показано, что силовое действие потока тепла определяется, в основном, фононным механизмом, имеющим одинаковый порядок величины в металлических и диэлектрических кристаллах при одинаковой величине градиента температуры. Установлено, что для дислокаций и границ раздела сила со стороны температурных напряжений значительно превосходит силу фононного увлечения, тогда как для точечных дефектов ситуация противоположная. Рассчитан коэффициент фононного увлечения точечных дефектов, проанализирована его роль в формировании диффузионно-дрейфовых явлений. Показано, что силовое действие электрического тока на точечные дефекты и границы раздела определяется электронным механизмом увлечения, тогда как для дислокаций доминирующей может быть сила, обусловленная эффектом электрон-фононного увлечения, характеризуемая коэффициентом увлечения до  $10^{-3}$ .

Сформулирована и исследована дислокационная модель деструкции полей внутренних напряжений под действием импульсов тока, основанная на динамических свойствах застопоренного плоского скопления дислокаций. Показано, что время задержки действия импульсного тока совпадает со временем динамической реакции дислокационного скопления. В рамках развитого подхода к описанию кинетики пластической деформации на основе концепции деструкции полей внутренних напряжений под действием импульсного электрического тока сформулирована система уравнений физической теории пластичности в условиях токового воздействия, решение которой позволило объяснить основные особенности электропластической деформации металлов.

Установлены оптимальные режимы электростимулирующего воздействия и физической природы эффекта пластификации металлов на основе созданного комплекса экспериментальных установок, методик и аппаратного обеспечения исследования электростимулированной пластической деформации на разных структурных уровнях.

На микроуровне для исследования подвижности индивидуальных дислокаций в области термоактивируемого движения разработаны и созданы установки,

позволяющие производить заданные законы механического нагружения образцов (нагрузкой до 5 МПа, длительностью  $10^{-4}$ –5 с) с одновременным синхронизированным пропусканием регулируемых по амплитуде (до 10 кА) и длительности (до 300 мкс) токовых импульсов.

В области квазивязкого движения дислокаций создана установка ударного механического и синхронизированного импульсного токового нагружения металлических кристаллов в диапазоне длительностей десятков микросекунд.

Для мезо- и макроскопического уровней исследования пластичности металлов разработан, создан и внедрен экономичный промышленный тиристорный генератор униполярных токовых импульсов с регулируемой частотой (0–1 кГц), амплитудой (0–15 кА) длительностью (75–200 мкс).

Для оценки напряженно-деформированного состояния материалов на макроуровне на базе генератора мощных токовых импульсов созданы установки, оснащенные микропроцессорной системой с датчиками, позволяющие реализовать пропорциональность частоты воспроизведения импульсов скорости волочения, соизмеримость времени остановки деформирования с периодом воспроизведения импульсов и блокировку подачи импульсов тока в момент остановки.

Для исследования волновой природы электростимулируемой пластической деформации на макроуровне на базе испытательной машины «Instron» создана установка, позволяющая подавать в зону деформации токовые импульсы регулируемой частоты ( $10^{-3}$ –500 Гц), амплитуды ( $\leq 8$  кА) и длительности 50–100 мкс.

Разработаны простые и надежные методики экспериментального определения амплитудного значения токовых импульсов, глубины скин-слоя, температуры поверхности материала и энергосиловых параметров процесса волочения.

Выяснено, что процесс постепенного накопления повреждений при усталостном нагружении возможно контролировать различными косвенными методами диагностики, наиболее предпочтительным из которых является ультразвуковой.

Установлено, что дислокационные субструктуры (ДСС) металлов и сплавов и их эволюция оказывают существенное влияние на усталостную прочность. Для каждого типа сталей и сплавов для полного понимания физической природы и механизмов усталостной деформации и разрушения проведены систематические исследования ДСС.

Доказаны возможности восстановления усталостной прочности металлов и сплавов с помощью обработки их мощными импульсами электрического тока, и установлена физическая природа эволюции дислокационных субструктур и структурно-фазовых превращений и разрушения сталей различных структурных классов и частичного восстановления их ресурса в условиях стимулирования токовыми импульсами при усталости.

## Глава 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

*Не смейтесь надо мной деленьем шкал,  
Естествоиспытателя приборы!  
Я, как ключи к замку, вас подбираю,  
Но у природы крепкие затворы  
(И. Гете)*

### История

Явление электрического взрыва проводников – это разрушение металлического проводника под действием мощного импульса электрического тока. Оно используется в ряде технологий упрочнения и защиты поверхности металлов и сплавов, которые нашли отражение не только в научной, но и в учебной литературе.

Первые работы, выполненные на кафедре физики СибГИУ в области модификации поверхности с использованием электровзрывной обработки, были посвящены вопросам разрушения преград высокоскоростными объектами. Такие исследования позволяли моделировать разрушение обшивки космических аппаратов при столкновении с микрометеоритами. Они отвечали запросам времени, связанным с освоением космоса. В этих работах возможность получать импульсные плазменные струи продуктов электрического взрыва проводников, обладающие высокой скоростью (около 10 км/с) и плотностью (порядка 0,1 кг/м<sup>3</sup>), позволила эффективно использовать их для ускорения частиц порошков и мелких тел, вносимых в область взрыва. Интерес представляло также взаимодействие с поверхностью плазменного компонента импульсных сверхзвуковых многофазных плазменных струй. При их натекании на преграду облучаемая поверхность испытывала действие ударной волны и ударно-сжатого слоя плазмы с высокими значениями температуры и давления.

Электровзрывная обработка материалов начала свое развитие в середине 60-х годов прошлого века в лаборатории электроимпульсных процессов кафедры физики с конструирования и изготовления лабораторной электровзрывной установки ЭВУ 60/10. Меняя путем выбора зарядного напряжения емкостного накопителя энергии интенсивность термосилового воздействия на поверхность, изучали абляцию поверхности закаленных сталей и хрупкое разрушение без оплавления ионных кристаллов, кальцита, кремнистого железа (В.Н. Гурарий, Ю.М. Коробов). В 1969 году с использованием установки ЭВУ 60/10 был завершен цикл исследований, результаты которых были защищены сотрудником кафедры В.Н. Гурарием в кандидатской диссертации. Результаты исследований нашли отражение в монографии В.М. Финкеля [40], в то время заведующего кафедрой физики. Впоследствии эти исследования позволили предложить способ повышения стойкости теплозащитных покрытий лопаток газотурбинного двигателя.

С развитием лазерной техники в 60–70-е годы начались активные исследования воздействия лазерного излучения на металлы. Такая обработка поверхности позволяла, в частности, проводить плакирование, закалку из твердого и жидкого

состояния, поверхностное легирование. С начала 70-х годов стали появляться монографии [41], которые обобщали результаты лазерной термической и химико-термической обработки металлов и сплавов. Исследования в этой области продолжаются и сегодня. В 70-е годы они стимулировали развитие исследований по использованию электровзрывной обработки не только для разрушения, но и для защиты и упрочнения поверхности.

Развитие метода упрочняющей обработки поверхности, который впоследствии получил название электровзрывного легирования, началось с конца 80-х годов в СибГИУ. В основе его были работы, выполненные П.С. Носаревым под руководством В.М. Финкеля, а также в Днепропетровском технологическом институте по формированию сплавов на поверхности металлов при облучении плазменными струями, сформированными из продуктов электрического взрыва проводников. Аналогичные работы в 80-е годы выполнялись и в Московском авиационно-технологическом институте.

Исследование взаимодействия плазменных струй с поверхностью без ее оплавления показало, что в результате обработки на ней формируется покрытие из конденсированных частиц продуктов взрыва (Е.В. Евстифеев). Эта особенность обусловлена тем, что электровзрывное разрушение материала проводника при использовании как соосных, так и коаксиальных электродов сопровождается образованием конденсированных частиц продуктов взрыва. Причем при разлете они отстают от плазменного компонента, поэтому сначала с поверхностью взаимодействует плазменный фронт, а затем – конденсированные частицы. Незначительное повышение интенсивности воздействия, вызывающее оплавление облучаемой поверхности, позволяет обеспечить металлургическую (когезионную) связь покрытия с основой. Кстати, сама возможность электровзрывного нанесения покрытий, имеющих прочную связь с подложкой, впервые была показана М. Фарадеем. Им были получены покрытия из вольфрама и молибдена на алюминии и стали при взрыве проволоки, которые обладали высокой адгезией вследствие образования зоны перемешивания между покрытием и подложкой.

Возможности нанесения покрытий при высокоинтенсивных режимах обработки при использовании плазменных струй как носителя частиц порошковой навески, которая вводилась в область взрыва, были изучены в работах Л.Н. Гудимовой. Режим обработки с оплавлением поверхности обеспечивал высокую адгезию покрытия с основой, а выбор материала частиц – необходимые свойства. Эти работы органично дополнили исследования электровзрывного (или электроимпульсного) нанесения покрытий путем взрыва проволочек, которые получили наибольшее развитие в Японии. Можно также отметить, что исследования в области электровзрывного нанесения покрытий с использованием коаксиальных электродов, начавшиеся в СибГИУ в 70-е годы прошлого века, остаются актуальными и сегодня. Современное состояние в области разработки способов нанесения покрытий характеризуется тем, что в качестве «несущей» среды используются газовые и плазменные струи со все большими скоростями и плотностями, что обеспечивает получение покрытий с низкой пористостью и высокой адгезией с основой. Электровзрывные покрытия отвечают этим требованиям.

## Современное состояние вопроса

Одним из перспективных направлений использования электровзрывной обработки является электровзрывное легирование (ЭВЛ) поверхности металлов и сплавов с целью изменения структуры и повышения функциональных свойств обрабатываемой поверхности, таких, например, как твердость, износо- и жаростойкость и др. Реализация метода включает в себя три основных этапа. 1. Формирование из продуктов электрического взрыва проводников импульсной многофазной плазменной струи. 2. Оплавление ею поверхности и насыщение расплава плазменными и конденсированными компонентами струи. При этом в область взрыва можно вводить порошковые частицы различных веществ, что позволяет дополнительно придавать поверхности различные свойства. 3. Последующая кристаллизация зоны легирования в условиях самозакалки с образованием новых фаз и соединений.

Электровзрывное легирование является одним из методов обработки поверхности концентрированными потоками энергии, обеспечивающим поглощаемую плотность мощности порядка  $10^3$  Вт/см<sup>2</sup> и выше, при которой возможно оплавление облучаемой поверхности. В последние десятилетия они получают все большее развитие. При выборе методов упрочнения металлов и сплавов следует исходить из того, что функциональные свойства поверхностных слоев определяются, прежде всего, особенностями их структуры и фазового состава. Анализ литературы показывает, что наибольшего упрочнения удастся добиться при поверхностном легировании с использованием лазерного, электронно-пучкового и плазменного нагрева поверхности. При этом структура, фазовый состав и свойства модифицированных слоев зависят от технологических особенностей используемых методов обработки и параметров воздействия на упрочняемую поверхность. В ряде случаев совокупность физических процессов и параметров обработки при ЭВЛ позволяют создавать на поверхности структурно-фазовые состояния, недостижимые при использовании других аналогичных способов.

Изменение параметров многофазной плазменной струи позволяет использовать их не только для легирования поверхности, но и для электровзрывного напыления (ЭВН) покрытий. Оно заключается в нагреве до предплавильной температуры поверхности подложки плазменным фронтом струи и осаждении на ней конденсированных частиц из тыла струи.

В настоящее время работы по ЭВЛ и ЭВН на кафедре физики проводятся на модернизированной установке ЭВУ 60/10. Установка включает в себя источник питания 1, киловольтметр 2, конденсаторную батарею 3, управляемый разрядник 4 и импульсный плазменный ускоритель 5, разрядный контур 6 (рисунок 2.1). Максимальный энергозапас емкостного накопителя составляет 60 кДж, а частота разрядного тока – 10 кГц. Электрическая схема установки содержит: *TV1* – регулируемый трансформатор напряжения РНО – 250–10, имеющий регулируемую обмотку вторичного напряжения,  $U_{рег} = 0–250$  В; *TV2* – высоковольтный трансформатор напряжения типа НОМ-10-10000/10; *VD* – однополупериодный диодный выпрямитель, выполненный на высоковольтном диоде КЦ201Е; УВР – управляемый вакуумный разрядник, использующийся в качестве замыкателя це-

пи;  $QS1$ ,  $QS2$  – автоматические выключатели; разрядную штангу  $R_{ш}$ , служащую для снятия остаточного потенциала батареи  $CB$  в целях обеспечения безопасности обслуживающего персонала; резистор  $R1$ , служащий для ограничения амплитуды зарядного тока батареи  $CB$ ; резистор  $R2$ , служащий для ограничения амплитуды разрядного тока, вызываемого включением разрядной штанги; электродвигатель  $M$ , являющийся приводом вакуумных насосов.

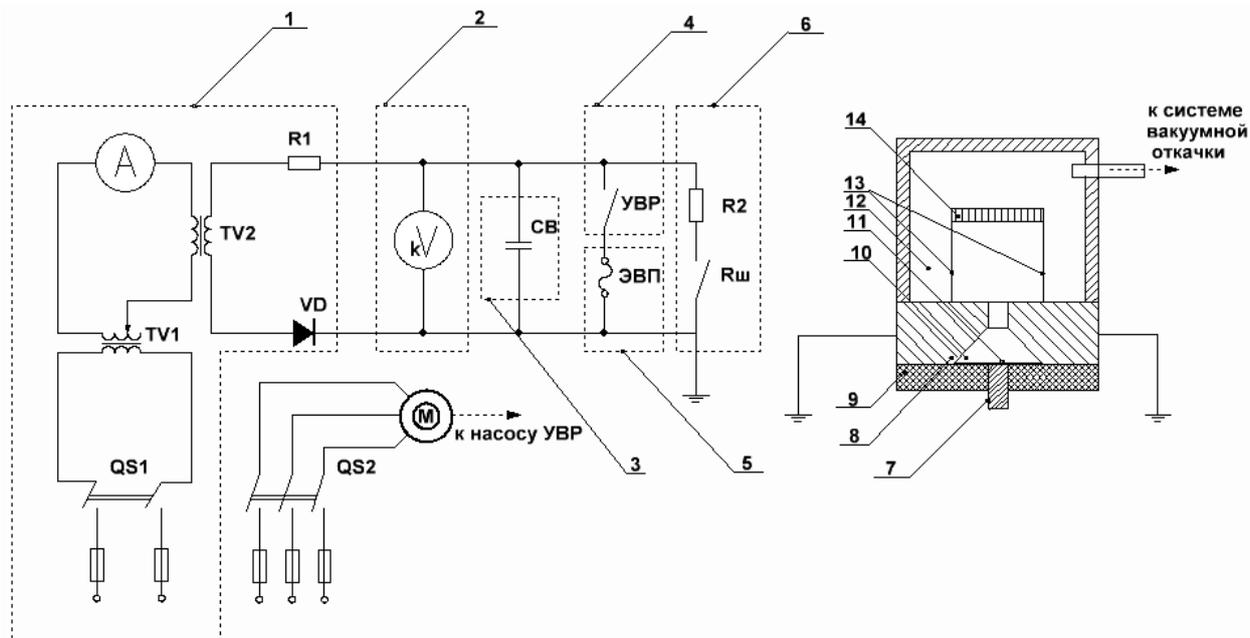


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение лабораторной электровзрывной установки ЭВУ 60/10

Работа плазменного ускорителя для электровзрывной обработки основана на накоплении энергии батареями импульсных конденсаторов и её последующем разряде через проводник, испытывающий при этом взрывное разрушение. Напряжение от накопителя подается на плазменный ускоритель, который состоит из коаксиально-торцевых электродов – внутреннего цилиндрического электрода 7, внешнего кольцевого электрода 8, разделенных изолятором 9, и разрядной камеры 10, локализирующей продукты взрыва и переходящей в сопло. Электровзрыв происходит в результате пропускания через проводник 11 тока большой плотности при разряде конденсаторной батареи. Продукты взрыва истекают в вакуумируемую технологическую камеру 12 с остаточным давлением 100 Па. Держатели образцов 13 обеспечивают фиксированное на определенной высоте от сопла положение обрабатываемого образца 14. Повышение массовой плотности продуктов взрыва, а также интенсивности теплового воздействия на поверхность упрочняемого материала до значений, достаточных для её оплавления за малое время импульса, которое составляет 100 мкс, и тем самым создание условий, необходимых для осуществления легирования, достигается применением торцевой коаксиальной системы электродов.

## Основные параметры электровзрывной установки ЭВУ 60/10:

энергоемкость, кДж.....	60
собственная частота разряда, кГц .....	10
максимальное значение заряда, кВ .....	5
дискретность регулирования напряжения заряда, кВ.....	0,1
максимальная производительность при максимальном напряжении заряда, цикл/ч .....	10
средняя потребляемая мощность при заряде не более, кВт.....	0,55

Результаты экспериментальных исследований и моделирования механизмов ЭВЛ (В.П. Симаков, В.Д. Сарычев, Е.В. Мартусевич, А.Я. Багаутдинов, О.А. Цвиркун, Е.А. Будовских ) были апробированы на конференциях в России и за рубежом и опубликованы в многочисленных статьях. Более 20-ти разработок защищены патентами на изобретения. В различные годы развитие исследований поддерживалось грантами РФФИ и Минобрнауки РФ.

В настоящее время доказано, в частности, повышение эксплуатационных свойств в несколько раз при электровзрывном науглероживании, карбоборировании, меднении и боромеднении железа, никеля и титановых сплавов ВТ20, ВТ6 и ВТ1-0, алитировании и бороалитировании железа и титана, углеродистой стали 45, штамповой стали Х12М и быстрорежущей стали Р6М5.

Диаграмма реализованных технологических процессов обработки поверхности на установке ЭВУ 60/10 показана на рисунке 2.2. Здесь  $q$  – плотность мощности, поглощаемая поверхностью при обработке и определяемая энергией заряда,  $m$  – масса взрываемого проводника и порошковой навески, помещаемой в область взрыва. Она включает две области параметров, соответствующих обработке поверхности без ее оплавления при нанесении покрытий и с оплавлением при осуществлении ЭВЛ.

В первой области при значении поглощаемой плотности мощности порядка  $10^3$  Вт/см<sup>2</sup> в зависимости от массы взрываемого проводника возможно нанесение покрытий частицами порошка, нанесение покрытий конденсированными продуктами взрыва, нанесение тонких пленок из продуктов взрыва, закалка из твердого состояния. Масса взрываемого проводника ~100 мг обеспечивает нанесение покрытий частицами порошка. Для примера на рисунке 2.3, а показано электровзрывное покрытие, сформированное с использованием частиц синтетического алмаза.

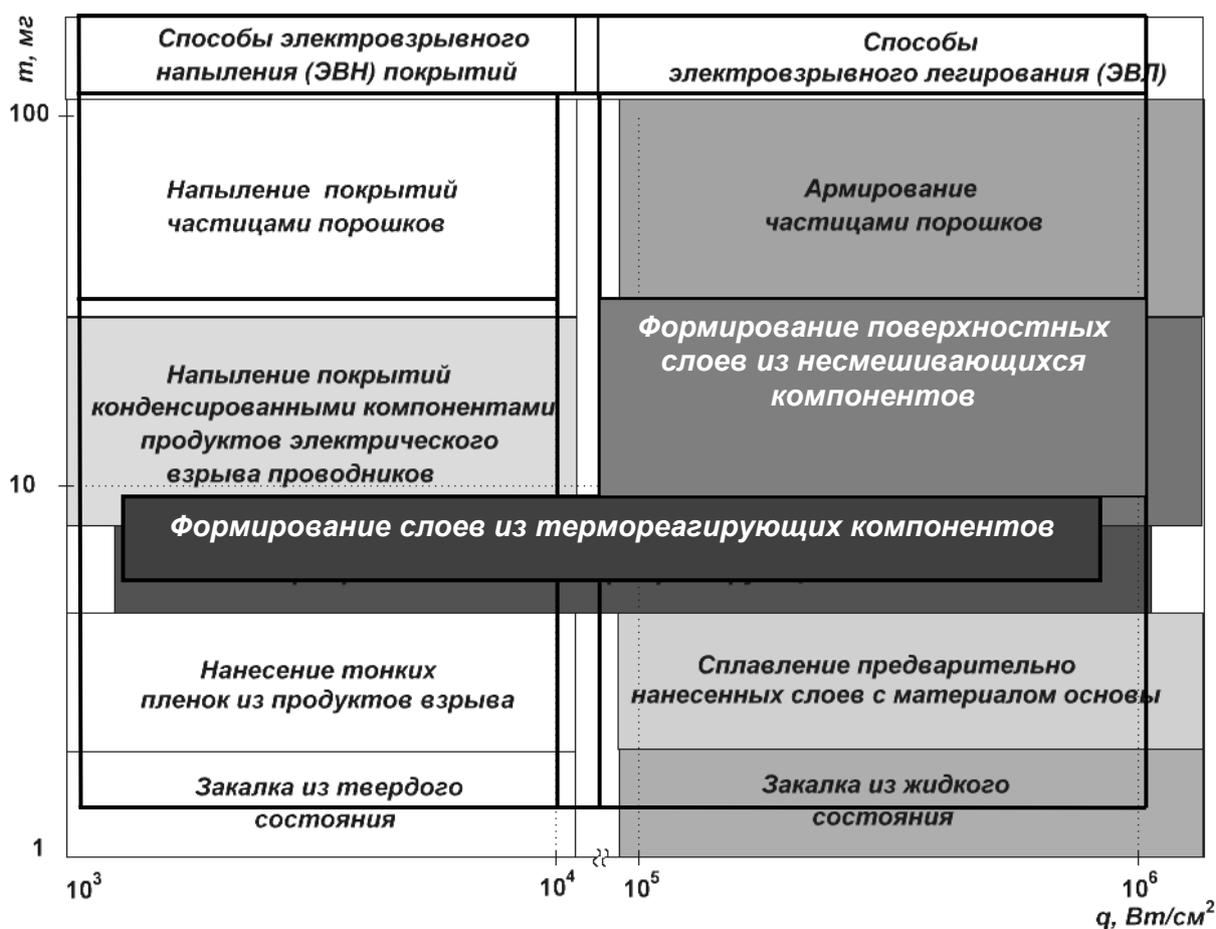
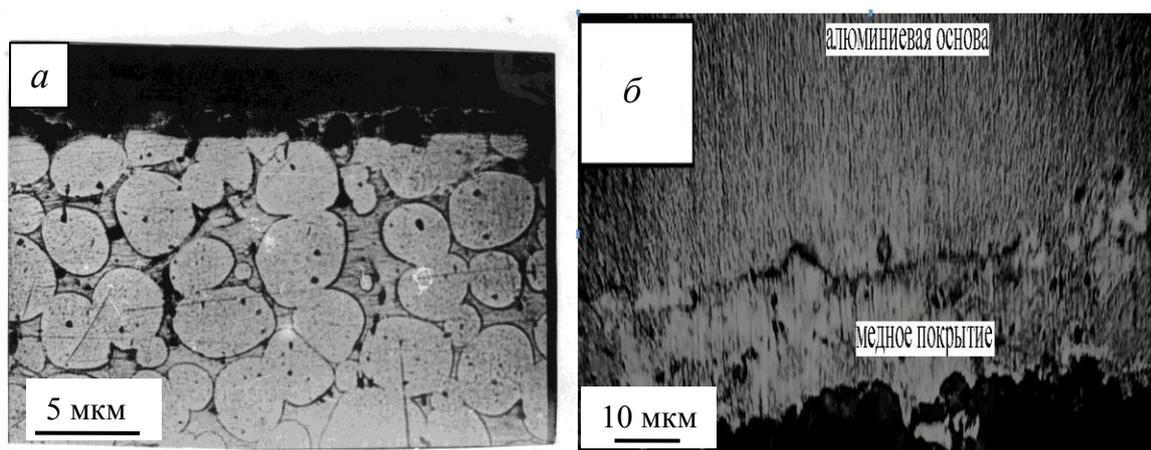


Рисунок 2.2 – Диаграмма реализованных на установке ЭВУ 60/10 технологических процессов поверхностного легирования и нанесения защитных покрытий с использованием многофазных плазменных струй



а – покрытие, сформированное с использованием частиц синтетического алмаза на поверхности стали; б – медное покрытие на поверхности алюминиевого кабельного наконечника

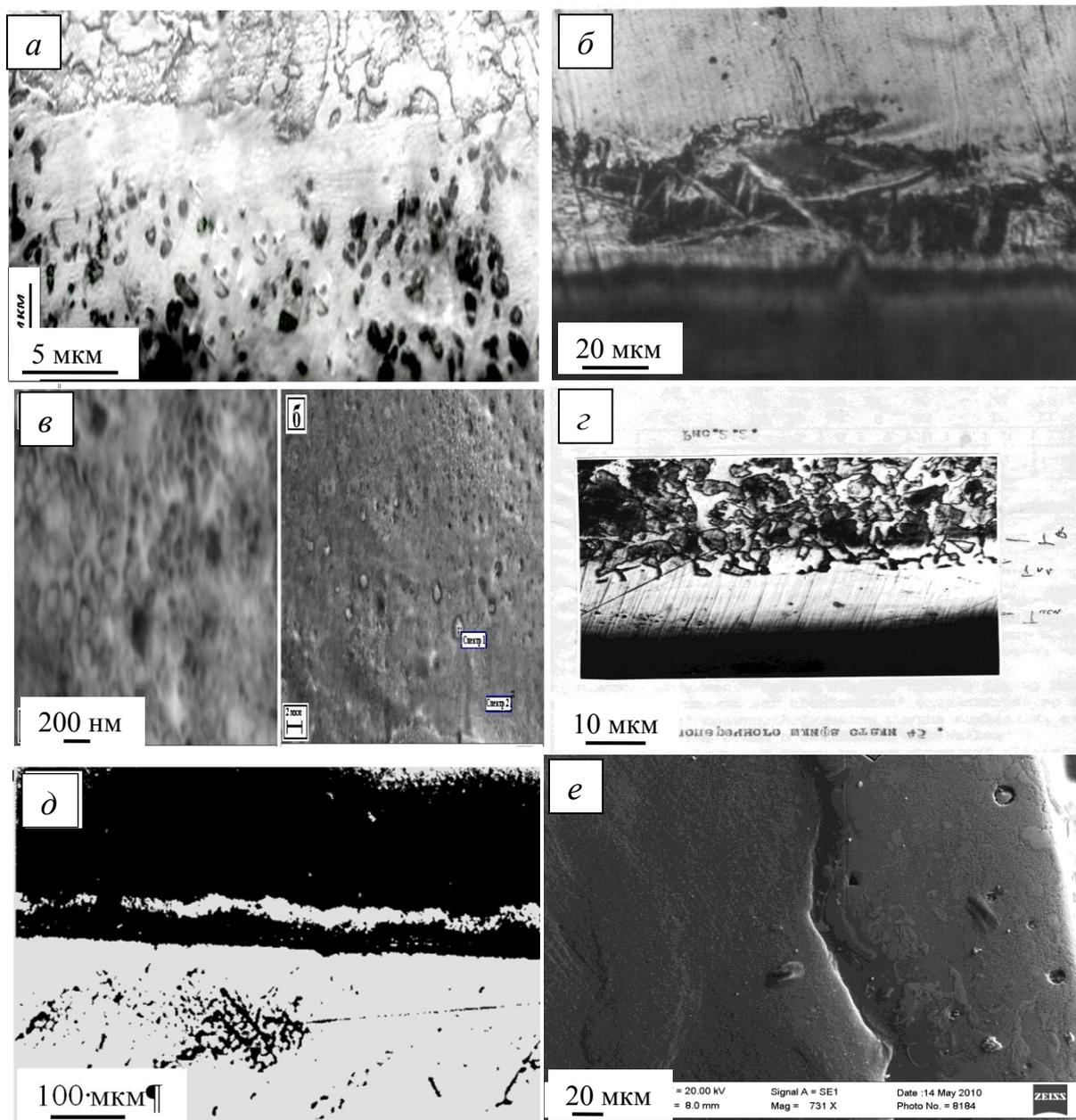
Рисунок 2.3 – Покрытия, нанесенные электровзрывным способом на установке ЭВУ 60/10

Уменьшение массы до значений порядка 10 мг обеспечивает нанесение покрытий конденсированными продуктами взрыва. Рисунок 2.3, б иллюстрирует этот режим в случае нанесения покрытия из продуктов взрыва медной фольги на поверхность алюминиевого кабельного наконечника. При дальнейшем уменьшении массы взрываемого проводника содержание и дисперсность конденсированных частиц продуктов взрыва в струе уменьшается. В этом случае оказывается возможным нанесение на облучаемую поверхность тонких пленок. При малых значениях массы взрываемого проводника положительный эффект обработки может быть достигнут также вследствие импульсной закалки поверхностных слоев из твердого состояния.

Во второй области, где поглощаемая плотность мощности порядка  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, обработка с использованием порошковых навесок позволяет проводить армирование оплавляемых поверхностных слоев частицами различных веществ (карбидов, оксидов, боридов и др.), помещаемых в область взрыва и переносимых на облучаемую поверхность (рисунок 2.4, а). В случае, когда порошковые навески не используются, возможно осуществление такого вида ЭВЛ, при котором расплав, образующийся на поверхности, насыщается продуктами взрыва проводников, в качестве материала которых могут выступать, например, тонкие фольги металлов и сплавов, углеродные и другие волокна (рисунок 2.4, б). Комплексное воздействие на поверхность высоких температур и давлений при ЭВЛ позволяет формировать поверхностные слои из несмешивающихся компонентов, таких как медь и молибден (рисунок 2.4, в). При малых массах взрываемого проводника, когда степень легирования расплава невелика, положительный эффект обработки может быть обусловлен закалкой из жидкого состояния слоев (рисунок 2.4, г). Еще одна возможность модификации структурно-фазовых состояний и свойств поверхности при ЭВЛ заключается в оплавлении и перемешивании предварительно нанесенных слоев с материалом основы (рисунок 2.4, д).

Особое положение занимает формирование слоев из термореагирующих компонентов при поглощаемой плотности мощности  $10^3 \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. На рисунке 2.4, е изображен пример такого слоя глубиной до 190 мкм, состоящего из интерметаллидов  $Al_3Ni_2$ ,  $AlNi$ ,  $AlNi_3$ , образованного при электровзрывном никелировании алюминия.

Таким образом, электровзрывная установка ЭВУ 60/10 имеет большие возможности управления режимом обработки поверхности, что обеспечивает реализацию различных способов ее упрочнения. Поглощаемая плотность мощности регулируется выбором таких параметров как диаметры внутреннего и внешнего электродов плазменного ускорителя, расстояние от его среза до облучаемой поверхности, а при их выборе – зарядного напряжения емкостного накопителя энергии. При ЭВЛ это обеспечивает широкий диапазон изменения поглощаемой плотности мощности:  $q = (1 \dots 10) \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Уменьшение  $q$  до  $10^3$  Вт/см<sup>2</sup> с целью нанесения покрытий достигается увеличением расстояния от облучаемой поверхности до среза сопла плазменного ускорителя.



*а – алитированный слой на стали 45, армированный частицами карбида кремния; б – науглероженный слой на поверхности железа; в – слой из несмешивающихся компонентов молибдена и меди на медной подложке; г – структура поверхности углеродистой стали после закалки из жидкого состояния; д – структура покрытия после сплавления предварительно нанесенных слоев; е – структура интерметаллидного слоя, образованного при никелировании алюминия*

*Рисунок 2.4 – Микрофотографии структур поверхностных слоев после различных видов электровзрывной обработки, реализованных на установке ЭВУ 60/10*

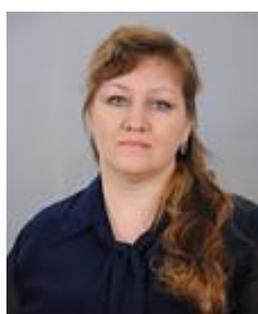
Область практического использования ЭВЛ ограничивается, в частности, тем, что обработка проводится с оплавлением, поэтому она сопровождается формированием на поверхности высокоразвитого рельефа. В последние годы в рабо-

тах А.В. Иониной, С.В. Карпия, О.Ю. Филимонова, Е.С. Ващук, Н.А. Сосковой и Л.П. Бащенко показано, что улучшение качества поверхности после ЭВЛ эффективно достигается при последующей электронно-пучковой обработке (ЭПО) на установке «СОЛО» Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН.

*Члены научной школы, принимающие активное участие в разработке новых способов электровзрывного легирования и напыления покрытий*



*Е.А. Будовских*



*Е.В. Мартусевич*



*А.В. Ионина*



*Е.С. Ващук*



*Д.А. Романов*



*О.В. Олесюк*



*В.Д. Сарычев*



*С.В. Карпий*



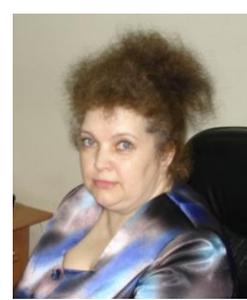
*Ю.Ф. Иванов*



*А.Я. Багаутдинов*



*Л.П. Бащенко*



*Н.А. Соскова*

Электровзрывная и электронно-пучковая обработка хорошо сочетаются друг с другом. Они имеют сопоставимые значения времени импульса, интенсивности воздействия, диаметра облучаемой поверхности, глубины зоны воздействия. При этом ЭПО, оказывая незначительное давление на поверхность обработки, выглаживает ее рельеф, приводит к стабилизации структурно-фазовых состояний зоны легирования, увеличивает ее глубину и сохраняет высокие твердость и износостойкость. Электронно-пучковая обработка с использованием низкоэнергетических сильноточных электронных пучков осуществляется в импульсно-периодическом режиме, что позволяет, с одной стороны, увеличить время нахож-

дения поверхностного слоя в расплавленном состоянии и гомогенизировать его элементный состав, а с другой, – сохранить закалочные эффекты, приводящие к формированию субмикро- и наноразмерной структуры.

Получены новые результаты в области комбинированной обработки, сочетающей ЭВН и последующую ЭПО. Как и другие результаты исследований, материалы по комбинированной обработке опубликованы в монографиях и защищены патентами.



*Обсуждение новых результатов, полученных при комбинированной обработке покрытий электротехнического назначения*

### **Перспективы развития научного направления**

Упрочняющая обработка импульсными плазменными струями, формируемыми при электрическом взрыве проводников, находится в одном ряду с другими аналогичными способами упрочнения поверхности – обработкой плазмой взрывчатых веществ, магнитоплазменных компрессоров [42], а также плазменно-детонационным способом [43]. Последние из них в настоящее время активно развиваются и используются в промышленности. Конструктивная простота и надёжность оборудования, гибкие возможности управления процессом обработки путём изменения технологических параметров позволяют сделать вывод о перспективности дальнейших научных исследований и практических разработок в области электровзрывного нанесения покрытий и ЭВЛ, а также о необходимости автоматизации оборудования для их реализации и повышения его производительности.

Использование модернизированной электровзрывной установки в условиях производства возможно при организации участков мелкосерийного упрочнения деталей и инструментов на промышленных предприятиях, например малых.

Диссертации, защищенные в области электровзрывного легирования и напыления покрытий

1. **Гурарий, В.Н.** Прочность и разрушение кристаллов при импульсном воздействии сверхзвуковых плазменных струй [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Гурарий Валерий Натанович. – Новокузнецк, 1969. – 23 с.

2. **Носарев, П.С.** Упрочнение и разрушение углеродистых сталей при воздействии быстрых плазменных пучков [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Носарев Павел Сергеевич. – Новокузнецк, 1973. – 21 с.

3. **Евстифеев, Е.В.** Получение и исследование физических свойств металлических покрытий на диэлектриках [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Евстифеев Евгений Васильевич. – Томск, 1991. – 18 с.

4. **Гудимова, Л.Н.** Обработка сплавов высокотемпературными плазменными потоками с целью создания слоев с особыми физическими свойствами [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Гудимова Людмила Николаевна. – Томск, 1992. – 25 с.

5. **Симаков, В.П.** Поверхностное легирование металлов при воздействии плазмы конденсаторного разряда [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Симаков Вадим Петрович. – Москва, 1992. – 22 с.

6. **Будовских, Е.А.** Формирование структурно-фазового состояния и свойств поверхностных слоев металлов при электровзрывном легировании [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Будовских Евгений Александрович. – Новокузнецк, 1999. – 24 с.

7. **Сарычев, В.Д.** Математическое моделирование процессов образования и поведения градиентных структур в металлах при внешних энергетических воздействиях [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Сарычев Владимир Дмитриевич. – Новокузнецк, 2002. – 21 с.

8. **Мартусевич, Е.В.** Формирование строения, структурно-фазовых состояний и свойств зоны двухкомпонентного электровзрывного легирования металлов [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Мартусевич Елена Владимировна. – Новокузнецк, 2004. – 18 с.

9. **Багаутдинов, А.Я.** Закономерности формирования градиентных структурно-фазовых состояний при электровзрывном науглероживании и карбоборировании металлов [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Багаутдинов Азис Явдатович. – Новокузнецк, 2006. – 22 с.

10. **Цвиркун, О.А.** Формирование нанокompозитных слоев на поверхности железа и никеля при электровзрывном легировании [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Цвиркун Оксана Александровна. – Новокузнецк, 2007. – 19 с.

11. **Будовских, Е.А.** Закономерности формирования поверхностных слоев металлов и сплавов при электровзрывном легировании [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Будовских Евгений Александрович. – Новокузнецк, 2008. – 37 с.

12. **Ионина, А.В.** Электронно-пучковая модификация структуры и свойств поверхности электровзрывного легирования стали 45 [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ионина Анна Валерьевна. – Новокузнецк, 2010. – 16 с.

13. **Карпий, С.В.** Особенности поверхностного упрочнения титана при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке [Текст]: автореф. дис. канд. ... техн. наук / Карпий Сергей Васильевич. – Новокузнецк, 2011. – 20 с.

14. **Филимонов, С.Ю.** Закономерности формирования структуры и свойств поверхностного слоя стали 45, модифицированной методами электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Филимонов Сергей Юрьевич. – Томск, 2012. – 21 с.

15. **Ващук, Е.С.** Формирование структуры и свойств углеродистой стали при электровзрывном боромеднении и электронно-пучковой обработке [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ващук Екатерина Степановна – Новокузнецк, 2012. – 18 с.

16. **Романов, Д.А.** Формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозсионностойких покрытий методом электровзрывного напыления [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Романов Денис Анатольевич. – Новокузнецк, 2012. – 17 с.

17. **Соскова, Н.А.** Упрочнение титана ВТ1-0 комплексным электровзрывным легированием и последующей электронно-пучковой обработкой [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Соскова Нина Александровна – Новокузнецк, 2013. – 18 с.

18. **Бащенко, Л.П.** Упрочнение поверхности титана при электровзрывном науглероживании и карбоборировании титана и последующей электронно-пучковой обработке [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Бащенко Людмила Петровна. – Новокузнецк, 2012. – 18 с.

#### Монографии, изданные по результатам разработки способов ЭВЛ и ЭВН

1. **Багаутдинов, А.Я.** Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов: монография / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – 301 с.

2. **Иванов, Ю.Ф.** Структура, фазовый состав и свойства титана после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки: монография / Ю.Ф. Иванов, С.В. Карпий, М.М. Морозов и др. – Новокузнецк: Изд-во НПК, 2010. – 170 с.

3. Формирование структурно-фазовых состояний металлов и сплавов при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке: монография / под ред. Громова В.Е. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2011. – 212 с.

4. **Романов, Д.А.** Электровзрывное напыление электроэрозионностойких покрытий: формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозионностойких покрытий методом электровзрывного напыления: монография / Д.А. Романов, Е.А. Будовских, В.Е. Громов. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 170 с.

5. **Иванов, Ю.Ф.** Структура, фазовый состав и свойства поверхностных слоев титана после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки: монография / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, Е.А. Будовских и др. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2012. – 435 с.

#### Патенты, полученные при разработке способов ЭВЛ и ЭВН

1. Пат. 2438217 РФ, МПК H01R 11/11. Электрический наконечник / Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е.; Заявл. 18.10.2010; опубл. 27.12.2011. Бюл. № 36.

2. Пат. 2436863 РФ, МПК C23C 14/32, C23C 14/14. Способ нанесения псевдосплавного молибден-медного покрытия на медную контактную поверхность / Будовских Е.А., Громов В.Е., Романов Д.А.; Заявл. 02.03.2010; опубл. 20.12.2011. Бюл. № 35.

3. Пат. 2436864 РФ, МПК C23C 14/32, C23C 14/14. Способ нанесения композиционного ламинатного молибден-медного покрытия на медную контактную поверхность / Будовских Е.А., Романов Д.А., Громов В.Е.; Заявл. 01.04.2010; опубл. 20.12.2011, Бюл. № 35.

4. Пат. 2451110 РФ, МПК C23C 14/24, C23C 14/16. Способ нанесения на контактные поверхности электроэрозионностойких вольфрам-медных композиционных покрытий с наполненной структурой / Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е.; Заявл. 31.01.2011; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14.

5. Пат. 2451111 РФ, МПК C23C 14/24, C23C 14/16. Способ нанесения на контактные поверхности электроэрозионностойких молибден-медных композиционных покрытий с наполненной структурой / Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е.; Заявл. 31.01.2011; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14.

6. Пат. 2451112 РФ, МПК C23C 14/32, C23C 14/16, B32B 15/01. Способ нанесения на контактные поверхности электроэрозионностойких вольфрам-медных композиционных покрытий со слоистой структурой / Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е.; Заявл. 31.01.2011; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14.

7. Пат. 2453029 РФ, МПК H02M 3/07. Регулируемый множитель напряжения Жмакина / Жмакин Ю.Д., Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е., Кузнецов В.А.; Заявл. 30.03.2011; опубл. 10.06.2012, Бюл. № 16.

8. Пат. 2456369 РФ, МПК C23C 4/10, C23C 4/12. Способ формирования титан-бор-медных покрытий на медных контактных поверхностях / Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е.; Заявл. 08.11.2010; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20.

9. Пат. 2455388 РФ, МПК C23C 14/32, C23C 14/16. Способ нанесения на контактные поверхности электроэрозионно-стойких молибден-медных композиционных покрытий со слоистой структурой / Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е.; Заявл. 31.01.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19.

10. Пат. 118792 РФ, МПК Н01Н 33/66. Контакт вакуумной дугогасительной камеры / Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е.; Заявл. 05.03.2012; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21.

11. Пат. 2464354 РФ, МПК С23С 14/32, С23С 14/16. Способ формирования вольфрам-углерод-медных покрытий на медных контактных поверхностях / Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е.; Заявл. 22.04.2011; опубл. 20.10.2012, Бюл. № 29.

12. Пат. 2470089 РФ, МПК С23С4/08, С23С4/12. Способ формирования молибден-углерод-медных покрытий на медных контактных поверхностях / Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е.; Заявл. 31.08.2011; опубл. 20.12.2012, Бюл. № 35.

13. Пат. 2470090 РФ, МПК С23С14/32, С23С14/30, С23С8/20. Способ нанесения покрытий на основе карбида титана на титановые сплавы / Романов Д.А., Бащенко Л.П., Будовских Е.А., Ионина А.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф.; заявл. 07.04.2011; опубл. 20.12.2012, Бюл. № 35.

14. Пат. 2398046 РФ, МПК С Способ поверхностного упрочнения вольфрамокобальтового твердосплавного инструмента / Осколкова Т.Н., Будовских Е.А.; Заявл. 27.08.2009; опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24.

15. Пат. 2404493 РФ, МПК С Электротехническое соединительное изделие / Будовских Е.А., Романов Д.А.; Заявл. 14.12.2009; опубл. 20.11.2010, Бюл. № 32.

16. Пат. 2405061 РФ, МПК С Способ поверхностной обработки вольфрамокобальтового инструмента / Осколкова Т.Н., Будовских Е.А.; Заявл. 09.07.2009; опубл. 27.11.2010, Бюл. № 33.

17. Пат. 2413792 РФ, МПК С Способ упрочнения поверхности вольфрамокобальтового твердосплавного инструмента / Осколкова Т.Н., Будовских Е.А.; Заявл. 10.09.2009; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7.

18. Пат. 2422555 РФ, МПК С23С 4/12, С23С 24/08. Способ электровзрывного нанесения металлических покрытий на контактные поверхности / Будовских Е.А., Романов Д.А.; Заявл. 14.12.2009; опубл. 26.06.2011, Бюл. № 18. 19. Пат. 2430194 РФ, МПК С Способ упрочнения твердосплавного инструмента на основе карбида вольфрама / Осколкова Т.Н., Будовских Е.А.; Заявл. 22.03.2010; опубл. 27.09.2011, Бюл. № 27.

20. Пат. 2473712 РФ, МПК С Устройство для электровзрывной обработки поверхности материалов / Жмакин Ю.Д., Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е., Кузнецов В.А.; Заявл. 14.07.2011; опубл. 27.01.2013, Бюл. № 3.

Научные проекты, выполненные при поддержке РФФИ и Минобрнауки РФ  
в рамках федеральной целевой программы  
«Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»  
на 2009–2013 годы

1. Физическая природа структурно-фазовых превращений при одно- и двух-компонентном электровзрывном легировании поверхности металлов и сплавов (07-08-92102-ГФЕН\_а).

2. Фундаментальные исследования механизмов формирования и закономерностей эволюции структуры и физико-механических свойств сплавов на основе железа при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке (08-02-00024-а).

3. Разработка научных основ опытно-промышленной технологии совмещенного электровзрывного и электронно-пучкового наноструктурного упрочнения металлов и сплавов (08-02-12012-офи).

4. Разработка физических основ комбинированной технологии обработки поверхности сплавов на основе титана, сочетающей электровзрывное легирование и высокоинтенсивное электронно-пучковое облучение (11-02-12091-офи-м-2011).

5. Физическая природа формирования наноразмерных структурно-фазовых состояний и свойств при электровзрывном легировании и высокоэнергетической импульсной электронной обработке поверхности титана (11-02-91150-ГФЕН\_а).

6. Разработка физических основ экологически чистой технологии формирования электроэрозсионностойких и износостойких композитных покрытий, сочетающей электровзрывное напыление и облучение высокоинтенсивным электронным пучком (13-02-12009).

7. Формирование повышенных эксплуатационных свойств поверхностных слоев титана после электровзрывного науглероживания и обработки низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками (госконтракт № 14.740.11.0813).

### Глава 3. СЛАБЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ: ИСТОКИ, ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И СТАНОВЛЕНИЯ

*Учиться, и когда придет время  
Прикладывать усвоенное к делу –  
Разве это не прекрасно!  
(Конфуций)*

До 2004 г. основным направлением научных исследований научной школы «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий» были «сильные» внешние энергетические воздействия. Однако в 2004 г. после совещания основных ученых школы д.ф.-м.н., профессора Л.Б. Зуева, д.ф.-м.н., профессора В.Е. Громова, д.ф.-м.н., профессора В.И. Данилова, к.т.н., доцента С.В. Коновалова было принято решение расширить направление деятельности школы на так называемые «слабые» внешние энергетические воздействия, в качестве которых были выбраны воздействие слабыми электрическими потенциалами, создаваемыми как непосредственно путем присоединения проводников к источнику, так и путем создания контактной разности потенциалов, а также слабые магнитные поля.

Реализацией данного направления исследований занялся С.В. Коновалов, в научную группу которого вошли аспиранты кафедры физики С.В. Журавлева, Р.А. Филипьев, Д.В. Загуляев, Н.А. Котова, О.А. Столбоушкина, С.А. Невский, позже защитившие диссертации (кроме С.В. Журавлевой). Научное руководство исследованиями осуществляли д.ф.-м.н., профессора Л.Б. Зуев, В.Е. Громов и В.И. Данилов. Часть теоретических исследований выполнена к.ф.-м.н., доцентом В.А. Петруниным.

В результате научных исследований, выполненных методами современного физического материаловедения (оптическая, сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия) выявлены закономерности влияния слабых (электрические потенциалы, контактная разность потенциалов и магнитные поля) внешних энергетических воздействий на процессы пластической деформации (ползучесть, релаксация напряжений, процесс микро- и наноиindentирования) металлов (алюминий, медь) и сплавов (кремнистое железо). При этом:

- установлено, что приложение слабого электрического потенциала (до 5 В) и контактной разности потенциалов (при подключении Pb, Fe, Cu, Al, Cr, Zr, Ni, Ti) к алюминию и меди, подвергаемым испытаниям на ползучесть и релаксацию напряжений, влияет на эти процессы, существенно изменяя скорости ползучести и спада напряжений. Причем, эффект подключения электрического потенциала, задаваемого электрическим источником (максимальное изменение относительной скорости ползучести  $Q$  алюминия наблюдается при  $\varphi = -0,5$  В ( $Q = 1,176$ ) и при ползучести Cu при  $\varphi = -0,7$  В ( $Q = 0,877$ )), более сильно выражен, чем при создании контактной разности потенциалов (максимальное изменение относительной скорости ползучести Al наблюдается при  $\Delta\varphi = -0,25$  В ( $Q = 0,30$ ) и при ползучести Cu при  $\Delta\varphi = 0,45$  В ( $Q = 0,09$ )).

- установлено, что подведение электрического потенциала изменяет микротвердость алюминия, меди, циркония и др. металлов. Обнаружена зависимость микротвердости от величины подводимого электрического потенциала. Показано, что существуют зависимости микро- и нанотвердости металлов от массы подключаемых к ним металлов с другой работой выхода. Установлен экстремальный характер зависимости, индивидуальный для каждой конкретной пары металлов. Максимальный эффект увеличения микротвердости наблюдается при подключении Sn ( $m = 0,933$  кг) к Al ( $Q = 0,16$ ).

- показано, что подведение электрического потенциала 1 В к алюминию, подвергнутому ползучести и релаксации напряжений, активизирует перестройку дислокационной субструктуры, а также уменьшает средний размер ямок вязкого излома в зоне среза с 1,53 мкм до 1,17 мкм.

- при интерпретации установленных эффектов на основе анализа изменения поверхностного натяжения твердых тел выявлена квадратичная зависимость работы образования поверхности металла от электрического потенциала, что объясняет независимость эффектов от знака электрического потенциала. Установлено, что влияние подключаемых металлов на ползучесть, релаксацию напряжений, микро- и нанотвердость связано с типом их проводимости и значениями постоянной Холла для основного и присоединяемого металлов. Показано, что в основе наблюдаемых эффектов влияния электрических потенциалов лежат электростатические явления, обусловленные перераспределением электронов в приповерхностном слое металла.

- установлено немонотонное влияние постоянного магнитного поля при  $B \leq 0,30$  Тл на скорость ползучести алюминия, причем максимальный эффект  $Q = 0,55$  обнаружен при  $B = 0,07$  Тл, а минимальный  $Q = -0,57$  при  $B = 0,3$  Тл.

- обнаружен эффект восстановления значений микротвердости алюминия до первоначальных значений при отключении как постоянного, так и импульсного магнитных полей. Зависимость микротвердости от времени, прошедшего после отключения магнитного поля, подчиняется экспоненциальному закону. Показано, что существует критическое значение магнитной индукции  $B_p = 0,10$  Тл, ниже которого влияние магнитного поля на микротвердость не проявляется.

- показано, что магнитное поле  $B = 0,30$  Тл способствует развитию рельефа поверхности разрушения алюминия при ползучести с меньшими размерами (средний размер ямок вязкого излома  $d = 1,5$  мкм) по сравнению с испытаниями без него (средний размер ямок вязкого излома  $d = 3,4$  мкм) и инициирует увеличение с  $1,65 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  до  $2,20 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  скалярной плотности дислокаций, образующих, преимущественно, хаотическую дислокационную структуру, а также ускоряет процесс образования дислокационных петель.

- на основе сравнительного анализа полученных результатов и теоретических представлений показано, что наиболее вероятным механизмом влияния постоянного и импульсного магнитных полей на пластичность поликристаллического алюминия является активизация движения дислокаций за счет уменьшения энергетического барьера их закрепления на парамагнитных центрах в алюминии.

Данные результаты, вошедшие в совместные публикации, вылились в диссертационные работы:

- Р.А. Филиппева (кандидатская, 2009 г.) на тему «Влияние электрического потенциала и контактной разности потенциалов на пластическую деформацию металлов»;

- Н.В. Котовой (кандидатская, 2010 г.) на тему «Влияние поверхностного электрического потенциала на микротвердость и ползучесть меди»;

- Д.В. Загуляева (кандидатская, 2011 г.) на тему «Влияние слабых магнитных полей на микротвердость и ползучесть алюминия»;

- О.А. Столбоушкиной (кандидатская, 2011 г.) на тему «Закономерности влияния слабого электрического потенциала на эволюцию тонкой структуры и поверхности разрушения алюминия при ползучести»;

- С.А. Невского (кандидатская, 2012 г.) на тему «Влияние слабых электрических потенциалов на релаксацию напряжений в алюминии»;

- С.В. Коновалова (докторская, 2013 г.) на тему «Закономерности влияния электромагнитных полей и токов на пластичность металлов и сплавов».

Результаты научных исследований постоянно докладываются на научных конференциях как в России, так и за рубежом.

В рамках проведения исследований проходили стажировку в Институте перспективных материалов университета Циньхуа (Шеньчжэнь, КНР) аспиранты Р.А. Филиппев и О.А. Столбоушкина.

### **Научная школа сегодня**

Сегодня данное направление исследований курируют д.т.н., доцент С.В. Коновалов, к.т.н. Д.В. Загуляев, к.т.н. С.А. Невский. В выполнении исследований активно участвуют аспирантка кафедры физики имени профессора В.М. Финкеля Н.Г. Ярополова и студенты университета М. Пономарева, И. Комиссарова, В. Мясникова, В. Данчук. В 2014–2015 гг. в рамках работы данного направления выполняется инициативный проект РФФИ (руководитель С.В. Коновалов) «Исследование физических механизмов влияния электрических воздействий на деформационные характеристики меди».

### **Основные публикации**

#### Монографии

1. **Коновалов, С.В.** Прочность и пластичность металлов при слабых электрических воздействиях: монография / С.В. Коновалов, Р.А. Филиппев, О.А. Столбоушкина [и др.]. – Новокузнецк: Изд-во ОАО «Новокузнецкий полиграфический комбинат», 2009. – 180 с.

2. **Столбоушкина, О.А.** Структурно-фазовые состояния и дислокационная субструктура Al при ползучести: монография / О.А. Столбоушкина, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: Изд-во ОАО «Новокузнецкий полиграфический комбинат», 2010. – 182 с.

3. **Иванов, Ю.Ф.** Физические основы повышения усталостной долговечности нержавеющей сталей: монография / Ю.Ф. Иванов, С.В. Воробьев, С.В. Коновалов [и др.]. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2011. – 302 с.

4. **Коновалов, С.В.** Влияние электромагнитных полей и токов на пластическую деформацию металлов и сплавов: монография / С.В. Коновалов, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2013. – 293 с.

#### Патенты на изобретение, свидетельства о государственной регистрации

1. Пат. 2400927 Россия. МПК H03U 3/53. Генератор мощных токовых импульсов для интенсификации процессов обработки металлов давлением / Ю.Д. Жмакин, Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов [и др.]; (РФ). – № 2009140994/07; заявл. 05.11.2009; опубл. 27.09.2010, Бюл. № 27. – 9 с.

2. Пат. 2433444 Россия. МПК G05D 11/00, G22F 3/02. Способ управления ползучестью алюминия марки А85 / С.В. Коновалов, Л.Б. Зуев, Р.А. Филиппьев [и др.]; (РФ). – № 2010117981/02; заявл. 04.05.2010; опубл. 10.11.2011, Бюл. № 31. – 7 с.

3. Пат. 2441941 Россия. МПК С22F 3/02. Способ изменения микротвердости изделия из технически чистого алюминия / Р. А. Филиппьев, С. В. Коновалов, Л. Б. Зуев [и др.]; (РФ). - № 2010118876/02; заявл. 11.05.2010; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4. – 5 с.

4. РФ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в гос. реестре № 2011617677. Компьютерный комплекс фиксации данных эксперимента при испытаниях на ползучесть / А.С. Дружилов, С.В. Коновалов, С.Ю. Пронин, В.Е. Громов. – № 2011615904; (РФ); заявл. 09.08.2011; зарегистрировано 03.10.2011.

5. РФ Свидетельство о государственной регистрации базы данных в гос. реестре № 2011620853. Микротвердость технически чистого Al марки А85 в постоянном магнитном поле с индукцией до 0,3 Тл / Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, С.Ю. Пронин, В.Е. Громов. – № 2011620738; (РФ); заявл. 04.10.2011; зарегистрировано 30.11.2011.

6. Пат. 22497617 Россия. МПК С22F 3/02. Способ волочения алюминиевой проволоки / Д.В. Загуляев., С.В. Коновалов, И.А. Комиссарова, В.Е. Громов; (РФ). – № 2012110451/02; заявл. 19.03.2012; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31. – 5 с.

7. Пат. 2502825 Россия. МПК С22F 3/02. Способ регулирования долговечности изделия из алюминия, работающего в условиях ползучести / Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, И.А. Комиссарова, В.Е. Громов; (РФ). – № 2012119810/02; заявл. 14.05.2012; опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36. – 6 с.

#### Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Данилов, В.И. Макролокализация пластической деформации при ползучести мелкокристаллического алюминия / В.И. Данилов, С.В. Коновалов,

С.В. Журавлева [и др.] // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75. – Вып. 3. – С. 94–97.

2. Коновалов, С.В. Влияние электрического потенциала на процесс деформации алюминия / С.В. Коновалов, В.И. Данилов, Л.Б. Зуев [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9. – С. 103–106.

3. Коновалов, С.В. О влиянии электрического потенциала на скорость ползучести алюминия / С.В. Коновалов, В.И. Данилов, Л.Б. Зуев [и др.] // Физика твердого тела. – 2007. – Т. 49. – Вып. 8. – С. 1389–1391.

4. Коновалов, С.В. Автоматизированная установка для регистрации и анализа ползучести металлов и сплавов / С.В. Коновалов, В.И. Данилов, Л.Б. Зуев [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – № 8. – Т. 73. – С. 64–66.

5. Konovalov, S.V. Change of creep velocity of Al under external energy influence / S.V. Konovalov, R.A. Filip'ev, V.I. Danilov [etal.] // Перспективные материалы, Специальный выпуск, сентябрь 2007. – Т.2. – С. 371–373.

6. Столбоушкина, О.А. Роль слабых электрических потенциалов в формировании поверхности разрушения Al при ползучести / О.А. Столбоушкина, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2008. – № 4. – С. 14–16.

7. Зуев, Л.Б. О влиянии контактной разности потенциалов и электрического потенциала на микротвердость металлов / Л.Б. Зуев, В.И. Данилов, С.В. Коновалов [и др.] // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51. – Вып. 6. – С. 1077–1080.

8. Коновалов, С.В. Управление пластичностью металлов слабыми электрическими воздействиями / С.В. Коновалов, Н.В. Котова, О.А. Столбоушкина [и др.] // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. – 2009. – Т. 4. – № 4. – С. 65–70.

9. Коновалов, С.В. Роль электрического потенциала в ускорении ползучести и формировании поверхности разрушения Al / С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, О.А. Столбоушкина, В.Е. Громов // Известия РАН. Серия физическая. – 2009. – Т. 73. – № 9. – С. 1315–1318.

10. Иванов, Ю.Ф. Эволюция поверхности разрушения алюминия, формирующейся при ползучести с наложением потенциала / Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов, О.А. Столбоушкина, В.Е. Громов // Физика и химия обработки материалов. – 2009. – № 5. – С. 80–83.

11. Иванов, Ю. Ф. Формирование тонкой структуры и поверхности разрушения Al под действием слабых электрических потенциалов / Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов, О.А. Столбоушкина [и др.] // Машиностроение и инженерное образование. – 2009. – № 4(21). – С. 17–24.

12. Gromov, V.E. Dislocation substructure evolution on Al creep under the action of the weak electric potential / V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, O.A. Stolboushkina, S.V. Konovalov // Materials Science and Engineering A 527. – 2010. – P. 858–861.

13. Иванов, Ю.Ф. Влияние электрического потенциала на эволюцию дефектной субструктуры и поверхности разрушения алюминия при ползучести» /

Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов, О.А. Столбоушкина [и др.] // Вестник Нижегородского университета имени Н.И. Лобачевского. – 2010. – № 1. – С. 57–63.

14. Столбоушкина, О.А. Формирование тонкой субструктуры алюминия при ползучести с действием электрического потенциала / О.А. Столбоушкина, Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов [и др.] // Материаловедение. – 2010. – № 8. – С. 12–16.

15. Невский, С.А. Изменение активационного объема процесса релаксации напряжений в алюминии при подключении различных металлов / С.А. Невский, С.В. Коновалов, В.Е. Громов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2010. – Т. 15. – вып.3. – С. 827–828.

16. Невский, С.А. Изменение активационного объема процесса релаксации напряжений алюминия при действии слабых электрических потенциалов и подключении различных металлов / С.А. Невский, С.В. Коновалов, В.Е. Громов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2010. – Т. 7. – № 1. – С. 17–20.

17. Невский, С.А. Влияние электрического потенциала поверхности алюминия на процесс релаксации напряжений / С.А. Невский, С.В. Коновалов, В.Е. Громов // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81. – вып. 6. – С. 133–136.

18. Филиппьев, Р.А. Влияние электрического потенциала на характер изменения поверхностного натяжения железа / Р.А. Филиппьев, С.В. Коновалов, В.А. Петрунин [и др.] // Металлы. – 2011. – № 1. – С. 105–108.

19. Петрунин, В.А. Влияние электрического потенциала на формирование дислокационной субструктуры при ползучести алюминия / В.А. Петрунин, С.В. Коновалов, О.А. Столбоушкина [и др.] // Металлы. – 2011. – №3. – С. 31–38.

20. Konovalov, S.V. Dislocation substructure gradient formation in aluminum by creep under weak potential / S.V. Konovalov, Yu.F. Ivanov, O.A. Stolboushkina, V.E. Gromov // The Arabian journal for science and engineering. – 2011. – № 36. – P. 649–653.

21. Коновалов, С.В. Влияние магнитного поля на поверхность разрушения алюминия при ползучести / С.В. Коновалов, Д.В. Загуляев, Ю.Ф. Иванов [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 2 (1). – С. 33–37.

22. Петрунин, В.А. Исследование релаксации напряжений при изменении электрического потенциала поверхности алюминия, деформированного сжатием / В.А. Петрунин, С.А. Невский, С.В. Коновалов [и др.] // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. – 2011. – Т. 16. – Вып. 3. – С. 826–828.

23. Иванов, Ю.Ф. Влияние электрического потенциала на процесс перестройки дислокационных субструктур алюминия при релаксации напряжений / Ю.Ф. Иванов, С.А. Невский, С.В. Коновалов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 1. – С. 78–81.

24. Петрунин, В.А. О влиянии слабых электрических воздействий на релаксацию напряжений / В.А. Петрунин, С.А. Невский, С.В. Коновалов [и др.] // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2011. – № 2(115). Март. – С. 85–88.

25. Столбоушкина, О.А. Особенности формирования дислокационной субструктуры при ползучести алюминия в условиях приложенного потенциала / О.А. Столбоушкина, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов [и др.] // Перспективные материалы. – 2011. – № 1. – С. 47–52.

26. Загуляев, Д.В. Особенности дислокационной структуры алюминия, формирующейся при ползучести в магнитном поле / Д.В. Загуляев, Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 5. – С. 8–12.

27. Невский, С.А. Эволюция дислокационной субструктуры алюминия при релаксации напряжений в условиях слабых электрических воздействий / С.А. Невский, Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 4. – С. 45–51.

28. Невский, С.А. Влияние внешних электрических воздействий на процесс релаксации механических напряжений алюминия / С.А. Невский, С.В. Коновалов, С.Н. Кульков [и др.]. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2011. – № 4. – С. 23–26.

29. Загуляев, Д.В. Характер влияния слабых магнитных полей на микротвердость монокристаллов цинка / Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, И.А. Комиссарова, В.Я. Целлермаер, В.Е. Громов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – № 1. С. 101–104.

30. Konovalov, S.V. Contact electric potential influences of the microhardness of metals / S.V. Konovalov, F.A. Filipiev, L.B. Zuev, D.I. Danilov, I.A. Komissarova, V.E. Gromov // Metalurgija. – 2012. – Vol.51. – No. 3. – P. 404.

31. Загуляев, Д.В. Изменение чувствительности микротвердости Al к магнитному полю при его многократном воздействии / Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, И.А. Комиссарова, В.Е. Громов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – № 3. – С. 295–299.

32. Загуляев, Д.В. Изменение микротвердости алюминия разной чистоты в слабых магнитных полях / Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, В.Е. Громов, В.Я. Целлермаер // Цветные металлы. – 2012. – № 9. – С. 85–89.

33. Петрунин, В.А. Физические аспекты влияния слабых магнитных полей на деформационное поведение Al / В.А. Петрунин, Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, В.Е. Громов, В.Я. Целлермаер // Известия Алтайского государственного университета. Серия Физика. – 2012 – № 1/2(73). – С. 150–153.

34. Загуляев, Д.В. Закономерности изменения микротвердости меди после магнитной обработки / Д.В. Загуляев, Н.Г. Литвиненко, И.А. Комиссарова, С.В. Коновалов, В.Е. Громов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2013. – № 2. – С. 261–265.

35. Загуляев, Д.В. Особенности и закономерности изменения кинетики ползучести меди в магнитном поле / Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов,

Н.Г. Литвиненко, И.А. Комиссарова, В.Е. Громов // Цветные металлы. – 2013. – № 4. – С. 74–77.

36. Невский, С.А. Механизм влияния слабых электрических потенциалов на ползучесть алюминия / С.А. Невский, С.В. Коновалов, И.А. Комиссарова, В.Е. Громов // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – № 4. – С. 15–19.

37. Загуляев, Д.В. Закономерности изменения деформационного поведения поликристаллической меди после магнитной обработки / Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, И.А. Комиссарова, Н.Г. Литвиненко, В.Е. Громов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 1763–1766.

38. Столбоушкина, О.А. Влияние электрического потенциала на формирование поверхности разрушения алюминия при ползучести / О.А. Столбоушкина, Г. Танг, Г. Сонг, С.В. Коновалов, В.Е. Громов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математические науки. Информатика. – 2013. – № 7. – С. 14–19.

39. Филиппьев, Р.А. Влияние контактных воздействий на микротвердость металлов / Р.А. Филиппьев, С.В. Коновалов, В.Е. Громов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2013. – № 1(165). – С. 177–181.

### **Общественно-профессиональное признание**

В рамках реализации работ по направлению «Слабые электромагнитные воздействия» были выиграны конкурсы на заключение государственных контрактов с Министерском образования и науки РФ по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2011 гг.» на темы: «Управление структурообразованием металлов и сплавов с интегральными оценками их свойств фрактальными моделями» (2011–2012 гг.) (контракт с Минобрнауки РФ 16.740.11.0314 от 07.10.2010); «Установление физических механизмов влияния магнитных полей на процесс пластической деформации меди» (2012–2013 гг.) (Соглашение с Минобрнауки РФ № 14.В37.21.1166 от «23» октября 2012 г.). В 2013 г. был выигран грант РФФИ на тему «Издание монографии «Влияние электромагнитных полей и токов на пластическую деформацию металлов и сплавов» (2013 г.) (Проект № 13-08-07022д).



*В перерыве между заседаниями  
на XVII Международной конференции «Физика прочности  
и пластичности материалов» (Самара, 2009 г.)  
(д.ф.-м.н., профессор В.И. Бетехтин, д.т.н., доцент С.В. Коновалов)*



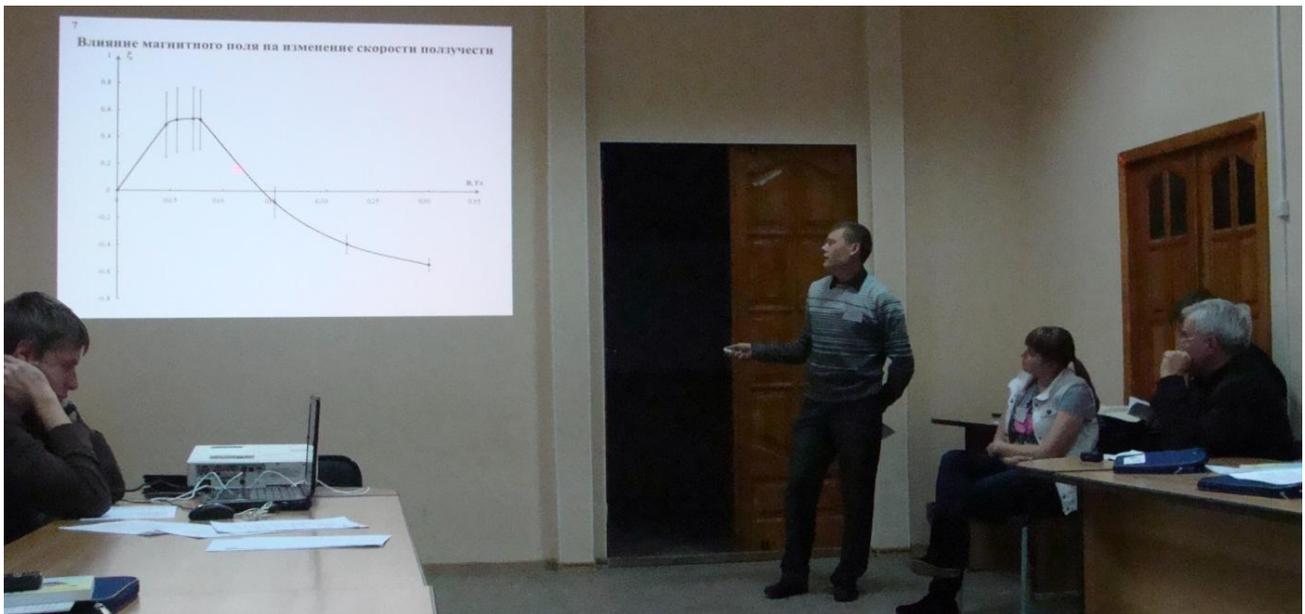
*После конференции  
(д.ф.-м.н., профессор В.А. Федоров, д.ф.-м.н., профессор В.А. Викарчук,  
д.ф.-м.н., профессор А.М. Глезер, участница конференции и д.т.н.,  
доцент С.В. Коновалов)*



*Награды в конкурсе «Лучший экспонат» на Кузбасской ярмарке (Новокузнецк, 2009 г.) (д.т.н., доцент С.В. Коновалов – 7-й слева)*



*Д.В. Загуляев и С.В. Коновалов за обсуждением экспериментов (2010 г.)*



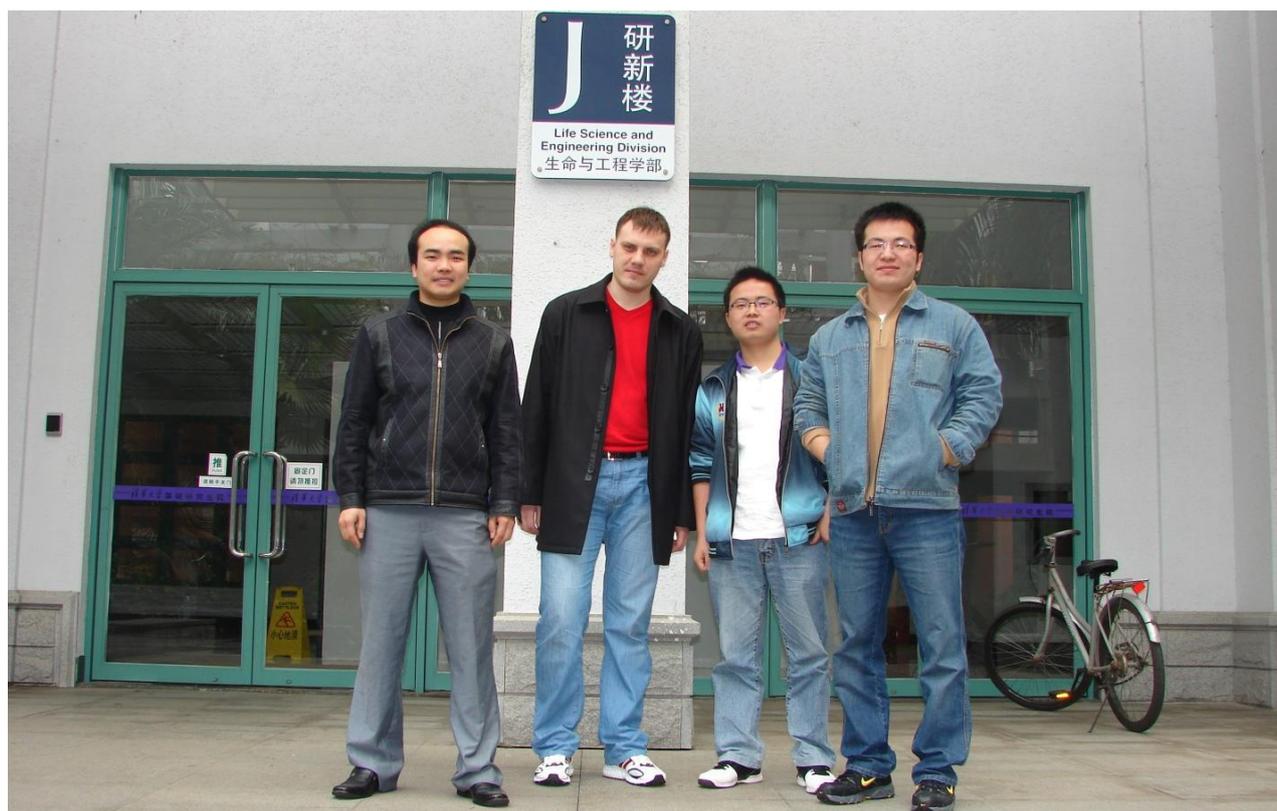
*К.т.н. Д.В. Загуляев делает доклад на XI Международной научно-технической уральской школе-семинаре молодых ученых-металловедов (Екатеринбург, 2010 г.)*



*Встреча на 75-летию СибГИУ*



*На II Московских чтениях по проблемам прочности, посвященных 80-летию со дня рождения академика РАН Ю.А. Осипьяна (Черноголовка, 2011 г.) (С.В. Коновалов – 8-й справа)*



*К.т.н. Р.А. Филипьев (в центре) на стажировке в Китае (Шеньчжэнь, 2010 г.)*



*К.т.н. О.А. Столбоушкина (в центре) на стажировке в Китае (Шеньчжэнь, 2011 г.)*

**Сибирского государственного индустриального университета**

**Эволюция зеренной структуры поверхностного слоя стали 08X18H10T, подвергнутой электронно-пучковой обработке**

Д.А. Бессонов<sup>1</sup>, С.В. Воробьев<sup>1</sup>, С.В. Коновалов<sup>1</sup>, Ю.Ф. Иванов<sup>1</sup>, В.И. Мясникова<sup>1</sup>, Я.В. Белоусова<sup>2</sup>, В.Е. Громов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк  
<sup>2</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск

Целью работы являлось изучение закономерностей эволюции зеренной структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой высокоинтенсивной электронно-пучковой обработке. В качестве материала использовали сталь марки 08X18H10T, в исходном состоянии которая являлась поликристаллическим агрегатом, в объеме зерен которого, в результате предварительной закалки, была сформирована мартенситная структура. В качестве материала исследования использована сталь 08X18H10T соргамента ОАО «Кузнецкий металлургический комбинат». Химический состав стали приведен в табл. 1.

Таблица 1  
Химический состав стали 08X18H10T, вес.

C	Cr	Ni	Ti	Si	Mn
0,1	18,2	10,4	0,92	0,71	0,92

Исследуемая сталь до обработки электронным лучом является поликристаллическим материалом, зерна которого содержат микроволновки и дислокационную субструктуру. В объеме и вдоль границ зерен располагаются частицы карбидной фазы, размеры которых электронной микроскопии (рис. 1). Ячейки кристаллизации имеют равноосную форму. В стыках и вдоль границ ячеек располагаются включения второй фазы, а именно, частицы карбида титана состава TiC и, реже, частицы соединения Cr15Fe9. Частицы имеют округлую форму, средние размеры частиц 18,5 нм (размеры реальных частиц изменяются в пределах от 3,0 до 50 нм) (рис. 1, в). В объеме ячеек кристаллизации выявляются дислокации, распределенные хаотически (рис. 1, б). Скалярная плотность дислокаций  $3,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

На рис. 2 приведены функциональные зависимости, характеризующие изменение параметров структуры исследуемой стали от расстояния до поверхности обработки.

Обработка стали пучком электронов с плотностью энергии  $E_e = 10 \text{ Дж/см}^2$  приводит к формированию по границам зерен большого количества частиц второй фазы. При увеличении плотности энергии в результате высокоскоростной кристаллизации и последующего охлаждения в поверхностном слое стали формируется зеренная структура двух масштабных уровней. В зернах обоих масштабных уровней продольные и поперечные размеры изменяются коррелированным образом. Установлено, что зеренная структура поверхностного слоя стали в результате электронно-пучковой обработки при малой плотности энергии, является продуктом высокоскоростной динамической рекристаллизации. При обработке стали электронным пучком с  $E_e = 2 \text{ Дж/см}^2$  зеренная структура поверхностного слоя формируется в результате кристаллизации и последующего

*Студентка гр. СПК-09 В.И. Мясникова на конференции VI Всероссийской научно-технической конференции «Физические свойства металлов и сплавов» (Екатеринбург, 2011 г.)*



*Д.т.н., доцент С.В. Коновалов делает доклад на XX Петербургских Чтениях по проблемам прочности, посвященных памяти профессора В.А. Лихачева (Санкт-Петербург, 2012 г.)*



*На XX Петербургских Чтениях по проблемам прочности, посвященных памяти профессора В.А.Лихачева (Санкт-Петербург, 2012 г.), студентка гр. МСК-10 И.А. Комиссарова и д.ф.-м.н., профессор А.М. Глезер*



*S.B. Коновалов на International Conference on Nano and Materials Engineering*



*Общее фото участников конференции (Бангкок, 2013 г.)*

## Глава 4. ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

*Тот, кто хочет видеть результаты  
Своего труда немедленно,  
Должен идти в сапожники  
(А. Эйнштейн)*

Со времени построения первой кривой усталости прошло более 140 лет и в настоящее время кривые усталости построены для всех известных конструкционных материалов, однако, все еще не удалось полностью решить проблему циклической прочности ни в области изучения физической природы этого явления, ни в области инженерного подхода к этому вопросу. Огромный материал, накопленный и проанализированный в работах последних лет, подчеркивает сложность поведения металлов и сплавов при усталости.

Внутренняя логика развития науки об усталости определяется необходимостью построения последовательных описаний, основанных на эволюции структуры и фазового состава материала. Подходы и модели, используемые в механике деформируемого твердого тела, отражают, как правило, внешнюю реакцию материалов на циклические нагрузки и не учитывают структурных изменений. В их основе лежат деформационные, энергетические и силовые параметры напряженно-деформированного состояния, критерии развития трещин и уравнения линейной и нелинейной механики циклического разрушения для получения основной расчетной характеристики – скорости роста трещин. Однако совершенно очевидно, что для установления закономерностей накопления повреждений при усталости и физической природы явления на разных его стадиях большое значение имеет знание эволюции дислокационных субструктур и структурно-фазового состояния.

Прогресс в развитии современной техники неразрывно связан с повышением усталостной прочности материалов. В настоящий момент времени существует ряд способов повышения усталостного ресурса, среди которых особое место занимают внешние энергетические воздействия (плазменная, радиационная, лазерная обработка, ионная имплантация, импульсные токи).

Хорошо известно, что структурное состояние и физико-механические свойства поверхностного слоя во многом определяют сопротивление усталостному разрушению, износостойкость при различных условиях изнашивания, контактную выносливость, коррозионную стойкость и другие важные эксплуатационные свойства. В этой связи дальнейшее развитие методов, направленных на модификацию поверхностных слоев материала, следует считать актуальным и перспективным направлением повышения эксплуатационной надежности и долговечности деталей и конструкций.

Широкий спектр выполненных исследований по воздействию потоков заряженных частиц (электронов, ионов) на твердые тела, лазерной и плазменной обработке, электромагнитным полям, импульсным токам высокой частоты, электро-механической обработке и другим энергетическим воздействиям не только пока-

зал высокую перспективность этих методов в качестве инструмента для изменения поверхностных свойств металлов, сплавов, но и определил технологические направления их использования.

Принципиально важным в этом отношении представляется создание новых и дальнейшее совершенствование существующих технологических методов упрочнения материалов и деталей, позволяющих существенно повышать важнейшие эксплуатационные свойства, практически не влияя на конструкцию и размеры изделий. В последние годы перспективными являются работы, направленные на создание, изучение, совершенствование и практическое внедрение технологических методов поверхностного упрочнения, использующих высококонцентрированные источники энергии, обеспечивающих формирование в поверхностном слое высокопрочных наноструктур. В настоящее время способы упрочнения материалов путем формирования в них наноразмерных фаз еще мало изучены, хотя они очень перспективны, особенно при модификации металлических покрытий импульсными пучками, так как особенно эффективно наноструктурированные состояния достигаются при высоких скоростях нагрева и при малом времени воздействия высоких температур. Исследования, направленные на установление закономерностей формирования основных типов наноструктур в материалах позволяют целенаправленно применять определенные режимы высокоэнергетического воздействия для обеспечения необходимого комплекса эксплуатационных свойств, поэтому являются актуальными.

Одним из перспективных методов целенаправленной модификации структурно-фазового состояния поверхностного слоя металлов и сплавов является электронно-пучковая обработка, обладающая большими возможностями для контроля количества подводимой энергии, создания большой площади воздействия концентрированного потока энергии на обрабатываемый материал, малыми коэффициентами отражения энергии, высокой концентрацией энергии в единице объема материала, а соответственно, и большими возможностями перевода материала в высоконравновесное состояние. Электронно-пучковая обработка (ЭПО) обеспечивает сверхвысокие скорости нагрева (до 106 град/с) поверхностного слоя до заданных температур, формирование предельных по величине градиентов температуры (до 107–108 град/м) и охлаждение поверхностного слоя за счет теплоотвода в основной объем материала со скоростями 104–108 град/с. В результате в поверхностном слое создаются условия образования неравновесных структурно-фазовых состояний – субмикро- и нанокристаллических и аморфных. Это приводит к значительному (до 3-х раз) повышению усталостного ресурса нержавеющей сталей различных структурных классов.

Выяснение физических механизмов формирования и эволюции структурно-фазовых состояний и дислокационной субструктуры в сталях и сплавах при внешних энергетических воздействиях – одна из важнейших задач физики твердого тела. Экспериментальные исследования структур и фазового состава, формирующихся в сечении изделий в результате таких воздействий, очень важны для понимания физической природы превращений, поскольку позволяют целенаправленно изменить структуру и эксплуатационные параметры изделий. При этом по-

лучение необходимого комплекса высоких прочностных и пластических свойств требует понимания физических механизмов и природы структурно-фазовых изменений на всех масштабных условиях: от макро до нано.

Имея колоссальный опыт и накопленный материал по изучению электростимулированной усталости сталей различных структурных классов, научная школа «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий» не могла не обратить внимание на изучение возможности ЭПО в повышении усталостного ресурса. Переходным мостиком явилось исследование аспиранта С.В. Воробьева.

### **Результаты, полученные при исследовании усталости после ЭПО**

С.В. Воробьев начал проявлять интерес к физике еще будучи студентом металлургического факультета, после окончания которого им было принято твердое решение поступать в аспирантуру. Так, в 2004 году он поступил в аспирантуру на кафедру физики, где под руководством В.Е. Громова продолжалось изучение электростимулированной стали. В течение трех последующих лет был проведен ряд серьезных исследований по влиянию тока на усталость нержавеющей стали. Результаты были доложены на международных конференциях. В полной мере изучив влияние импульсного токового воздействия на различных структурно-масштабных уровнях в стали 08X18H10T, весной 2007 года С.В. Воробьев успешно защищает кандидатскую диссертацию на тему «Структурно-масштабные уровни многоциклового усталости нержавеющей аустенитной стали при импульсном токовом воздействии» по специальности «Физика конденсированного состояния». В дальнейшем, создав группу молодых исследователей, он приступает к изучению влияния на нержавеющую сталь нового перспективного метода модифицирования поверхности – электронно-пучковой обработки (ЭПО).

Предварительно выполненные тепловые расчеты, а также исследования структуры поверхности облучения показали, что ЭПО стали 08X18H10T в зависимости от плотности энергии и длительности воздействия пучка электронов (плотности мощности пучка электронов) позволяет осуществлять обработку материала в предплавленном режиме (превращения в твердом состоянии), в режиме начального плавления поверхности (снижение степени шероховатости поверхности путем оплавления неровностей, трещин и царапин), в режиме устойчивого плавления поверхностного слоя толщиной до нескольких десятков микрон. Исходя из этого были выбраны следующие режимы ЭПО: энергия электронов  $eU = 18$  кэВ; длительность импульса воздействия пучка электронов  $\tau = 50$  мкс; количество импульсов воздействия  $N = 3$ ; частота следования импульсов  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup>. Фиксируя данные характеристики пучка электронов, варьировали плотность энергии пучка электронов  $E_s$  в интервале от 10 до 30 Дж/см<sup>2</sup>. Электронным пучком обрабатывали лицевую поверхность образцов, приготовленных для усталостных испытаний.

Совместно с Институтом сильноточной электроники СО РАН были проведены комплексные исследования с помощью методов просвечивающей и скани-

рующей электронной микроскопии. Сопоставление структурно-фазового состояния разрушенных образцов стали в исходном состоянии и стали, обработанной высокоинтенсивным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия, дает основание заключить, что причинами увеличения усталостной долговечности модифицированной электронным пучком стали 08X18H10T является растворение частиц карбидной фазы в поверхностном слое, инициированное ЭПО, а также измельчение зеренной и субзеренной структуры. Данные наблюдения позволили расширить представление о структурно-фазовых преобразованиях нержавеющей стали и положили основу для исследования жаропрочной и износостойкой стали 20X13. В это время на кафедре физики сложился слаженный коллектив исследователей под руководством В.Е. Громова, привлекая к работе молодых аспирантов, удалось задать новый вектор исследований влияния ЭПО на нержавеющие стали. В 2010 году С.В. Воробьев поступает в докторантуру на кафедре физики и начинает работу над диссертацией.

### **Результаты, полученные при ЭПО стали 20X13 и последующем усталостном нагружении до разрушения**

Поступив в 2010 году в аспирантуру, присоединился к исследованиям, проводимым на кафедре физики, Д.А. Бессонов. Предварительно было решено изучить сталь, обладающую аустенитной структурой, и поэтому исходное состояние стали 20X13 формировали путем аустенизации (температура аустенизации 980 °С, время аустенизации 3 часа) и последующей закалки в масле. Аустенитизация стали привела к формированию поликристаллического агрегата, средние размеры зерен которого: продольный 19,8 мкм; поперечный 12,4 мкм. В результате осуществленной термической обработки в стали 20X13 сформирована мартенситная структура, особенностью которой является присутствие субмикронных частиц карбида типа  $M_{23}C_6$  округлой, реже глобулярной, формы, расположенных в объеме и по границам зерен. Сформировав необходимую структуру стали 20X13, образцы были подвергнуты испытаниям на многоцикловую усталость без и после электронно-пучковой обработки. Проведенные исследования легли в основу кандидатской диссертации Д.А. Бессонова и позволили заключить, что основной причиной повышения усталостной долговечности стали 20X13 электронно-пучковой обработкой является растворение присутствующих в стали перед облучением глобулярных частиц карбида типа  $M_{23}C_6$  субмикронных размеров, являющихся потенциально опасными элементами структуры, способными вызвать преждевременное разрушение стали при ее усталостных испытаниях.



*Д.А. Бессонов*

Совместно с ведущими исследователями кафедры физики Д.А. Бессонов активно проводил работу со студентами, принимал участие в грантах и федеральных целевых программах. За высокие научные показатели Д.А. Бессонов был удостоен специальной стипендии Губернатора Кемеровской области для молодых ученых.

К октябрю 2013 года Д.А. Бессонов собрал все результаты исследований воедино, проанализировал их и успешно защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Закономерности влияния электронно-пучковой обработки на структуру и фазовый состав стали 20Х13 при усталости» при диссертационном совете Сибирского государственного индустриального университета.

### **Результаты, полученные при ЭПО стали 20Х23Н18 и последующем усталостном нагружении до разрушения**

Совместно с С.В. Воробьевым, Д.А. Бессоновым начал изучать влияние ЭПО на структуру и свойства другой стали 20Х23Н18 аспирант кафедры физики В.В. Сизов, который выполнял подготовку образцов, их термическую обработку, испытания на многоцикловую усталость. Были проведены оптические исследования, их интерпретация и анализ были опубликованы в виде статей и монографий, а также доложены на международных конференциях в России и за рубежом.



*В.В. Сизов*

Исследования дефектной субструктуры и фазового состава поверхности облучения стали подтвердили факт ячеистой кристаллизации материала. Проведены исследования эволюции тонкой и зеренной структуры и фазового состава нержавеющей стали 20Х23Н18 при усталости после ЭПО для установления физической природы и механизмов увеличения ее усталостной долговечности. В ходе проведения исследований установлено, что:

- разрушение стали 20Х23Н18 в условиях многоциклового усталостного нагружения обусловлено совокупностью факторов, основными из которых являются: формирование локальных участков с критической структурой, неспособной к дальнейшей эволюции, и наличие глобулярных частиц второй фазы субмикронных размеров, являющихся концентраторами напряжений. Установлено, что поверхностный слой с критической структурой имеет толщину  $\sim 10$  мкм и характеризуется резкой границей раздела с нижерасположенным слоем материала;

- ЭПО поверхности стали при вариации плотности энергии пучка электронов (20, 30, 40) Дж/см<sup>2</sup> приводит к существенному (в  $\sim 2,3$  раза) измельчению зеренной структуры стали;

- ЭПО стали способствует формированию структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры, количественные характеристики которых закономерным образом изменяются по мере удаления от поверхности облучения;

- воздействие высокоинтенсивных электронных пучков смещает формирование при усталостных испытаниях областей критической структуры, являющихся потенциальным местом формирования микротрещин, в сторону большего количества циклов нагружения. Другими факторами повышения усталостной долговечности, инициированными ЭПО, является измельчение зеренной структуры, снижение уровня дальнедействующих полей напряжений, подавление процессов множественного микродвойникования и деформационного превращения  $\gamma \rightarrow \epsilon$  – мартенсит.



*В перерыве между экспериментами.  
Слева направо: С.В. Воробьев, С.В. Коновалов, В.Е. Громов*

Обобщение результатов влияния электронно-пучковой обработки на структуру, фазовый состав, дефектную субструктуру, полученных на сталях 08X18H10T, 20X13, 20X23H18 легло в основу формулы научного открытия. В январе 2014 года Российской академией естественных наук и Международной ассоциацией авторов научных открытий и изобретений был выдан Диплом об установлении научного открытия в Сибирском государственном индустриальном университете коллективом авторов: В.Е. Громов, С.В. Коновалов, С.В. Воробьев, В.В. Сизов. Для Новокузнецка и даже и региона это крайне редкое событие. Более 7 лет группа учёных под руководством профессора В.Е. Громова искала способ упрочнения металла и продления срока его службы, и многолетний труд был не напрасным.



*Фрагмент телепередачи «Семь дней» на телеканале ТВН, февраль 2014 г.*

В марте 2014 года В.В. Сизов, защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Формирование и эволюция структуры и фазового состава нержавеющей стали при электронно-пучковой обработке и многоцикловом нагружении до разрушения».

#### Основные публикации

Основные результаты данного направления исследований опубликованы в следующих работах.

1. Громов, В.Е. Модифицирование структурно-фазовых состояний поверхности нержавеющей стали электронно-пучковой обработкой / В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, С. В. Воробьев, С. В. Горбунов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2010. – №4. – С. 31–37.

2. Иванов, Ю.Ф. Структура поверхностного слоя, формирующегося в стали 08X18H10T, обработанной высокоинтенсивным электронным пучком, в условиях многоциклового усталости / Ю.Ф. Иванов, С.В. Горбунов, С.В. Воробьев // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14. – № 1. – С. 75–82.

3. Коновалов, С.В. Влияние токовой обработки на формирование градиентных структурно-фазовых состояний в аустенитной стали / С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, С.В. Воробьев, С.В. Горбунов [и др.] // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2010. – Т.15. – Вып.3. – С. 823–824.

4. Громов, В.Е. Формирование поверхностных градиентных структурно-фазовых состояний при электронно-пучковой обработке нержавеющей стали /

В. Е. Громов, С. В. Горбунов, Ю. Ф. Иванов [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2011. – № 10. – С. 62–67.

5. Иванов, Ю.Ф. Формирование структурно-фазового состояния поверхностного слоя стали 08X18H10T при обработке высокоинтенсивным электронным пучком / Ю.Ф. Иванов, С.В. Горбунов, В.Е. Громов, Ф [и др.] // Материаловедение. – 2011. – №5. – С.43–47.

6. Иванов, Ю. Ф. Фазовый состав и дефектная субструктура стали 20X13, обработанной электронным пучком в режиме оплавления поверхности / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, Д. А. Бессонов [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2011. – Т. 8. – № 3. – С. 28–34.

7. Иванов, Ю. Ф. Структурно-фазовое состояние поверхностного слоя, формирующееся в стали 20X13 в результате облучения высокоинтенсивным электронным пучком / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, С. В. Воробьев, Д. А. Бессонов, [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14. – № 6. – С. 111 – 115.

8. Иванов, Ю. Ф. Эволюция структуры и фазового состава стали 20X13 в процессе упрочняющей электронно-пучковой обработки и последующего усталостного нагружения / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, Д. А. Бессонов [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 12. – С. 19–23.

9. Бессонов, Д. А. Повышение усталостной долговечности стали 20X13 электронно-пучковой обработкой / Д. А. Бессонов, С. В. Воробьев, Ю. Ф. Иванов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 10. – С. 48–49.

10. Воробьев, С. В. Формирование градиентной структуры и фазового состава поверхностных слоев стали 20X13 после облучения высокоинтенсивным электронным пучком / С. В. Воробьев, Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, Д. А. Бессонов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2012. – № 4. – С. 97–99.

11. Бессонов, Д. А. Эволюция зеренной структуры поверхностного слоя стали 20X13, подвергнутой электронно-пучковой обработке / Д. А. Бессонов, Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 2. – С. 44–48.

12. Бессонов, Д. А. Формирование нанокристаллических структур в нержавеющей стали, подвергнутой электронно-пучковой обработке и многоциклового усталостному нагружению / Д. А. Бессонов, С. В. Воробьев, В. Е. Громов [и др.] // Наноинженерия. – 2013. – № 3. – С. 20–24.

13. Сизов, В. В. Эволюция зеренной структуры поверхностного слоя стали 20X23H18, подвергнутой электронно-пучковой обработке и многоциклового нагружению / В. В. Сизов, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 10. – С. 56–60.

14. Сизов, В. В. Формирование и эволюция зеренной структуры нержавеющей стали при электронно-пучковой обработке и многоциклового усталости / В. В. Сизов, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – № 2. – С. 136–140.

15. Иванов, Ю. Ф. Повышение усталостного ресурса стали 20X23H18 высокоинтенсивной электронно-пучковой обработкой / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов,

В. В. Сизов [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2011. – Т. 8. – № 4. – С. 131–136.

16. Воробьев, С.В. Формирование нанокристаллической структуры и усталостная долговечность нержавеющей стали / С. В. Воробьев, В. Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, В. В. Сизов [и др.] // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2012. – № 4. – С. 51–53.

17. Громов, В. Е. Увеличение усталостной долговечности нержавеющей стали электронно-пучковой обработкой поверхности / В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, В. В. Сизов [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2013. – №1. – С. 99–104.

18. Иванов, Ю. Ф. Структурно-масштабные уровни деформации стали 20Х23Н18, подвергнутой усталостному разрушению после электронно-пучковой обработки / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, В. В. Сизов [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т.16. – №1. – С. 85–90.

19. Иванов Ю. Ф. Эволюция структуры и фазового состава нержавеющей стали 20Х23Н18 при циклическом деформировании / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, В. В. Сизов [и др.] // Материаловедение. – 2013. – №4. – С.34–39.

#### Монографии

20. Иванов, Ю.Ф. Усталостная долговечность стали мартенситного класса, модифицированной высокоинтенсивными электронными пучками / Ю.Ф. Иванов, Д.А. Бессонов, С.В. Воробьев [и др.]. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2011. – 259 с.

21. Громов, В.Е. Усталость сталей, модифицированных высокоинтенсивными электронными пучками / В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, С. В. Воробьев, С. В. Горбунов, Д. А. Бессонов, В. В. Сизов, С. В. Коновалов. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2012. – 403 с.

## Глава 5. УСТАЛОСТНАЯ ВЫНОСЛИВОСТЬ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ

*Нации связаны рельсами  
(Г. Аполлинер)*

После установления закономерностей повышения сопротивления усталости нержавеющей стали при электронно-пучковой обработке совершенно естественно выглядело направление исследований по рельсовой стали. Рельсовая тематика традиционна для СибГИУ университета со времен «короля рельсов» Ю.В. Грдины.

Надежная работа железных дорог во многом определяются качеством и эксплуатационной стойкостью основного элемента железнодорожного пути – рельсов, при этом широкий спектр требований, предъявляемых в связи с этим к качеству железнодорожных рельсов, требует внедрения новых технологий упрочнения рельсов. Актуальность проблемы повышения эксплуатационных свойств рельсов обусловлена тем, что дальнейшее развитие железнодорожного транспорта предъявляет все возрастающие требования к качеству рельсовой стали. Однако отечественные объемно-закаленные рельсы из перлитной стали имеют сравнительно низкую эксплуатационную стойкость, в основном, из-за массового выхода по местным контактно-усталостным дефектам и значительного бокового износа. К исследованию проблем повышения усталости рельсов за счет электронно-пучковой обработки был привлечен производственник с Запсибметкомбината В.А. Гришунин, который в течение последних 4-х лет занимался данной проблемой.

Выполненные методами современного физического материаловедения исследования структурно-фазовых состояний рельсовой стали после электронно-пучковой обработки и последующего усталостного разрушения позволили сделать следующие выводы.

1. Показано, что облучение рельсовой стали высокоинтенсивным электронным пучком с параметрами: энергия электронов 18 кэВ, плотность энергии (10...30) Дж/см<sup>2</sup>, длительность воздействия 50 мкс и частота следования 0,3 с<sup>-1</sup> пучка электронов; количество импульсов воздействия 3 сопровождается плавлением поверхностного слоя и формированием структуры ячеистой и дендритной кристаллизации. Выявлено расслоение поверхностного слоя стали по углероду с образованием в стыках ячеек кристаллизации частиц графита при высокоскоростной кристаллизации, инициированной обработкой высокоинтенсивным электронным пучком.

2. Выявлен градиентный характер структуры, формирующейся в поверхностном слое стали, обработанной высокоинтенсивным электронным пучком. Показано, что в условиях высокоскоростного нагрева и охлаждения в режиме оплавления ( $E_s=10$  Дж/см<sup>2</sup>) в поверхностном (~0,5...1,0 мкм) слое стали формируется микронеоднородное структурно-фазовое состояние, представленное зернами  $\alpha$ -фазы с ячейками кристаллизации, в объеме которых образуются кристаллы мар-

тенсита наноразмерного диапазона, и зернами  $\alpha$ -фазы с кристаллами мартенсита субмикронного диапазона.

3. Высказано и обосновано предположение, что формирование неоднородной структуры поверхностного слоя связано, с одной стороны, со сверхвысокими скоростями нагрева и охлаждения (малым временем гомогенизации), реализующимися при обработке стали импульсным электронным пучком, и, с другой стороны, неоднородным структурно-фазовым состоянием стали перед облучением (зерна перлита и «псевдоперлита», зерна структурно свободного феррита).

4. В слое, расположенном на границе ванны расплава, выявлено формирование поликристаллической структуры с ультрамалым размером зерен (0,8...1,5 мкм), в объеме которых обнаружена наноразмерная мартенситная структура.

5. Показано, что в слое термического влияния, расположенном в температурном интервале сосуществования  $\alpha$ -фазы,  $\gamma$ -фазы и карбида железа, формируется многофазная морфологически многокомпонентная структура, что обусловлено структурной неоднородностью исходного состояния стали и малым временем термического воздействия, инициированного электронным пучком.

6. Установлено, что многоциклового усталостные испытания исходной стали с перлитной структурой сопровождаются 1) разрушением пластин цементита, осуществляемым перерезанием движущимися дислокациями и растворением вследствие ухода атомов углерода из кристаллической решетки цементита на дислокации; 2) повторным выделением на дислокациях наноразмерных частиц цементита (деформационное старение стали); 3) формированием субзеренной структуры; 4) увеличением суммарной плотности дислокаций (плотности дислокаций, сосредоточенных в границах субзерен и распределенных по объему зерна); 5) ростом амплитуды внутренних полей напряжений и плотности концентраторов напряжений вследствие несовместности деформации соседних зерен и субзерен,  $\alpha$ -фазы и включений цементита.

7. Выявлен режим облучения высокоинтенсивным электронным пучком, позволяющий многократно (в ~2,5 раза) увеличить усталостную долговечность стали Э76Ф. Показано, что преимущественным местом формирования концентраторов напряжений в облученной электронным пучком стали является граница раздела слоя высокоскоростной кристаллизации и слоя термического влияния (дно ванны расплава). Установлено, что увеличение усталостной долговечности стали, облученной электронным пучком, обусловлено формированием игольчатого профиля границы раздела, приводящего к диспергированию концентраторов напряжений и способствующего более однородному пластическому течению в подложке.

8. Установлено, что деформация приповерхностного слоя с модифицированной электронным пучком структурой (наноразмерный мартенсит) сопровождается релаксацией дислокационной субструктуры (снижением суммарной плотности дислокаций вследствие разрушения малоугловых границ кристаллов мартенсита), кратным увеличением плотности концентраторов напряжений и незначительным ростом амплитуды внутренних полей напряжений.

Основные результаты работ по повышению усталостной выносливости рельсовой стали электронно-пучковой обработкой нашли отражение в следующих публикациях.

1. **Иванов, Ю. Ф.** Структура феррито-перлитной стали, подвергнутой механическому полированию [Текст] / Ю. Ф. Иванов, В. А. Гришунин, С. В. Коновалов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2012. – Т. 9. – № 3. – С. 319–323.

2. **Громов, В. Е.** Повышение усталостной выносливости рельсовой стали электронно-пучковой обработкой // В. Е. Громов, В. А. Гришунин, Ю. Ф. Иванов [и др.] / *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. – 2012. – № 3. – С. 50–57.

3. **Громов, В. Е.** Природа увеличения усталостной долговечности рельсовой стали электронно-пучковой обработкой / В.Е. Громов, В.А. Гришунин, Ю.Ф. Иванов [и др.] // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. – 2012. – № 4. – С. 49–56.

4. **Гришунин, В. А.** Повышение усталостного ресурса рельсовой стали электронно-пучковой обработкой / В. А. Гришунин, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов [и др.] // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2013. – № 2. – С. 51–54.

5. **Иванов, Ю. Ф.** Электронно-пучковая обработка рельсовой стали: фазовый состав, структура, усталостная долговечность / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, В. А. Гришунин [и др.] // *Вопросы материаловедения*. – 2013. – №1 (73). – С. 20–30.

6. **Гришунин, В. А.** Структурно-фазовый градиент, формирующийся в рельсовой стали, подвергнутой обработке высокоинтенсивным электронным пучком / В.А. Гришунин, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов [и др.] // *Перспективные материалы*. – 2013. – №6. – С.75–80.

7. **Бессонов, Д. А.** Формирование градиентной структуры при электронно-пучковой обработке нержавеющей стали // Д. А. Бессонов, С. В. Воробьев, И.А. Комиссарова, ..., В. А. Гришунин [и др.]. / *Тезисы докладов XXI Уральской школы металлургов-термистов «Актуальные проблемы физического материаловедения сталей и сплавов»*. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2012. – С. 29.

8. **Сизов, В. В.** Влияние электронно-пучковой обработки на усталостную долговечность нержавеющей стали / В. В. Сизов, С. В. Воробьев, В. И. Мясникова, В. А. Гришунин [и др.]. / *Тезисы докладов XXI Уральской школы металлургов-термистов «Актуальные проблемы физического материаловедения сталей и сплавов»* – Магнитогорск, Изд-во МГТУ, 2012. – С. 100.

9. **Иванов, Ю. Ф.** Природа увеличения усталостного ресурса нержавеющей стали электронно-пучковой обработкой / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, В.В. Сизов, В.А. Гришунин [и др.]. – Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2012. – С. 87–96.

10. **Сизов, В. В.** Эволюция внутризеренной структуры аустенитной стали при многоциклового усталости после электронно-пучкового воздействия / В. В. Сизов, С. В. Воробьев, А. А. Юрьев, В. А. Гришунин [и др.]. // *Тезисы докла-*

дов VI евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур». – М.: Изд-во МиСИС, 2012. – С. 53.

11. **Громов, В. Е.** Формирование и эволюция наноразмерных структурно-фазовых состояний стали 20X23H18, подвергнутой электронно-пучковой обработке / В. Е. Громов, В. В. Сизов, В. А. Гришунин [и др.]. // Сборник материалов III Всероссийской молодежной конференции с элементами научной школы «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества». – М. : Изд-во ИМЕТ РАН, 2012. – С. 175–176.

12. **Gromov, V. E.** Nanosize carbides formation and fatigue life increase of stainless steel by electron beam treatment / V. E. Gromov, V. V. Sizov, S. V. Vorobiev, V. A. Grishunin [et al.] // Theses of XI International conference on nanostructured materials. – Rodos: NCSR «Demokritos», 2012. – P. 100.

13. **Сизов, В. В.** Структурно-фазовое состояние стали 20X23H18, подвергнутой усталостному разрушению после электронно-пучковой обработки / В. В. Сизов, С. В. Воробьев, С. В. Коновалов, ..., В. А. Гришунин [и др.] // Тезисы докладов 52 международной научной конференции «Актуальные проблемы прочности». – Уфа : Изд-во РИЦБашГУ, 2012. – С. 69.

14. **Бессонов, Д. А.** Эволюция структуры фазового состава аустенитной стали, подвергнутой электронно-пучковой модификации и последующему усталостному нагружению / Д. А. Бессонов, С. В. Воробьев, С. В. Коновалов, ..., В. А. Гришунин [и др.]. // Тезисы докладов XVIII Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов». – Самара, Изд-во СамГУ, 2012. – С. 53.

15. **Гришунин, В. А.** Изменение фазового состава и дислокационной субструктуры стали Э76Ф при воздействии высокоинтенсивным электронным пучком / В. А. Гришунин, С. В. Воробьев, О. А. Столбоушкина [и др.]. // Сборник материалов 53 международной научной конференции «Актуальные проблемы прочности». – Витебск : Изд-во ИТФ АН Белоруси, 2012. – Ч. 2. – С. 139.

16. **Гришунин, В. А.** Диаграммы структур, формирующихся в рельсовой стали после электронно-пучковой обработки / В. А. Гришунин, А.Б. Юрьев // Вестник СибГИУ. – 2013. – №1. – С.3–5.

17. **Громов, В. Е.** Повышение усталостного ресурса рельсовой стали электронно-пучковой обработкой / В.Е. Громов, В.А. Гришунин, Ю.Ф. Иванов [и др.] // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций». – Киев : ИПП НАНУ. 2013. – С. 86–88.

18. **Волков, К.В.** Повышение усталостной выносливости рельсовой стали электронно-пучковой обработкой / К. В. Волков [и др.]. – Новокузнецк: Изд-во Интер-Кузбасс, 2013. – 225 с.

## Глава 6. СВЯЗЬ НАУКИ С ПРОИЗВОДСТВОМ

Постановлением Правительства от 5 марта 2005 года № 109 присуждены премии Правительства РФ 2004г., в области науки и техники, и присвоены звания «Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники» группе ученых и специалистов за создание и внедрение новой бескислотной технологии производства холодноотянутого проката. Среди 15 награжденных 6 специалистов ОАО ЗСМК, которое выступило инициатором выдвижения работы, и четверо ученых нашего университета: В.И. Базайкин, В.Е. Громов, Н.М. Кулагин, В.Я. Целлермаер. Это было выдающееся событие в жизни Новоекзнецка и СибГИУ. Присуждение премии Правительства РФ подвело итог более чем двадцатилетней работы по созданию и внедрению новой технологии. Традиционные, для метизной промышленности России, конвенциональные технологии удаления окалины перед холодным волочением путем химической подготовки поверхности проката обеспечивали высокую степень очистки, однако возникающие при этом проблемы утилизации отработанных кислотных растворов, антикоррозионной защиты оборудования и устранения «травильной» надежно решены не были.

Применение альтернативных механических способов подготовки поверхности бунтовой катанки к холодному волочению позволяет уменьшить непроизводительные потери проката на перетрав, исключить отрицательные последствия наводороживания стали при травлении и проблемы утилизации отработанных кислотных растворов.

Внедрение на ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат» механического способа удаления окалины, включающего знакопеременную деформацию изгибом при прохождении катанки через двухполостной окалиноломатель и абразивную обработку ее поверхности дробью во вращающейся камере, потребовало изучения влияния параметров технологического процесса на изменение структуры и состояния поверхности проката.

Ученые СибГИУ принимали участие во всех стадиях этой работы: научный идеологический центр возглавлял В.Е. Громов, а общее, административное, в первую очередь, руководство осуществлялось Н.М. Кулагиным. В процессе выполнения работы были получены результаты, составившие основу 2-х докторских (В.И. Базайкин, В.Я. Целлермаер) и двух кандидатских диссертаций: опубликованы 4 монографии в центральных научных издательствах и более 200 научных статей в престижных физических журналах! Результаты подобного уровня достигаются усилиями не только непосредственных исполнителей. Неоценимая помощь была оказана коллегами из Института физики прочности и материаловедения СО РАН (проф. Л.Б. Зуев), Томского архитектурно-строительного университета (проф. Э.В. Козлов).



*Ученые СибГИУ и руководители ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»*

Разработанная технология механической очистки окалины широко используется в России (на заводе «Автономаль», г. Белебей, Башкортостан, заводе металлических сеток, г. Солнечногорск и других).

Всего за период 1995–2002 гг., по новой технологии изготовлено 40 тысяч тонн проволоки в ОАО «Солнечногорский завод металлических сеток "Лепсе"» и 350 тысяч тонн проволоки и калиброванного проката в ОАО «ЗСМК».

Если использовать сухие цифры, то переход на механический способ удаления прокатной окалины позволил предотвратить сброс: 3,5 тысяч тонн отработанных кислотных стоков в шламонакопитель и 41,5 тонн окислов азота, 90,2 тонны паров серной и 70,2 тонны паров соляной кислот в атмосферу, в ОАО «Солнечногорский завод металлических сеток "Лепсе"», 17 тысяч тонн закиси железа и 26 тысяч тонн хлорида кальция в отстойник-накопитель и 130-ти тонн паров соляной кислоты в атмосферу в ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат».

Экономический эффект, за весь период работы по новой бескислотной технологии производства холоднотянутого проката, составил 38 млн. руб. в ОАО «Солнечногорский завод металлических сеток "Лепсе"» и 120 млн. руб. в ОАО «ЗСМК».

### **Термомеханическое упрочнение проката и плазменное упрочнение валков**

Разработка технологий упрочнения, обеспечивающих получение требуемого комплекса прочностных и пластических свойств материалов, требует понимания природы процессов, протекающих в них. Выяснение физических

механизмов формирования и эволюции структурно-фазовых состояний является одной из важных задач современной физики конденсированного состояния, поскольку лежит в основе разработки и создания эффективных способов повышения служебных характеристик.

В последние годы производство высококачественного проката все более смещается в сторону получения комплекса свойств в потоке прокатного стана в процессе термомеханической обработки. Применение технологий принудительного охлаждения с температуры конца прокатки для упрочнения фасонного проката обеспечивает наиболее эффективное использование достаточно дорогих легирующих материалов при одновременном повышении свойств изделий.

Не менее важной проблемой, в значительной степени определяющей показатели работы станов, является повышение стойкости чугунных валков. Одним из направлений ее решения является плазменная закалка рабочей поверхности калибров валков. Процесс упрочнения заключается в высокотемпературном нагреве плазменным потоком участка поверхности (анодное пятно) и его интенсивном охлаждении со скоростями, обеспечивающими закалочные структуры. При этом стойкость валков может возрастать на ~60 %.

Решение указанных выше практических задач невозможно без понимания природы процессов формирования и эволюции структурно-фазовых состояний в сталях и сплавах в условиях внешних энергетических и деформационных воздействий.

Воздействие высоких степеней и градиентов деформации, температуры, концентрированных потоков энергии способно привести к возникновению нанокристаллического состояния в поверхностных слоях обрабатываемых изделий. Это является приоритетным направлением исследований. Создание металлопродукции нового поколения должно строиться на принципах бурно развивающихся нанотехнологий, базирующихся на фундаментальных исследованиях физической природы наноструктурирования.

В течение последних 12 лет в рамках научной школы выполнены комплексные исследования и внедрены технологические решения повышения эксплуатационных свойств в металлургической системе «Стальной прокат – чугунные валки».

1. На различных масштабных уровнях (макро-, мезо-, микро- и нано-) установлена природа формирования и изменения структурно-фазовых состояний, дислокационной субструктуры и механических свойств стального арматурного и фасонного проката и чугунных валков при современных упрочняющих обработках, обеспечивающих существенное увеличение служебных характеристик при последующей эксплуатации.

2. Плазменная упрочняющая обработка валков из чугуна марки СШХНФ приводит к формированию зоны оплавления и зоны термического влияния (макроуровень). Слой, образовавшийся в результате высокоскоростной кристаллизации расплава, имеет столбчатое строение (мезоуровень). Сформированные  $\alpha$ -фаза,  $\gamma$ -фаза, графит и цементит распределены в объеме

исследуемого материала закономерным образом, их относительное содержание и морфология существенно зависят от глубины слоя (микроуровень). В поверхностном слое обнаружено формирование нанокристаллической зеренной структуры на основе  $\alpha$ -фазы (размер кристаллитов 35–40 нм), стабилизированной частицами цементита размером ~3–5 нм (наноуровень). Максимальный уровень дальнедействующих полей напряжений ( $\sigma = 2450$  МПа) формируется в поверхностном слое в наноразмерных зернах феррита, минимальный ( $\sigma = 350$  МПа) – в зернах структурно свободного феррита.

3. Эксплуатация плазменноупрочненных валков из чугуна СШХНФ сопровождается множественными закономерными изменениями дефектной субструктуры и фазового состава. Наблюдается существенное (~ на порядок) измельчение включений графита, их растворение, приводящее к формированию эвтектоидной структуры. Упрочненная поверхность разбивается трещинами на фрагменты размером 30–400 мкм, наблюдается выкрашивание материала путем вырывов размеров 50–150 мкм и расслоение материала по хрому и никелю.



*Олег Юрьевич Ефимов – доктор технических наук, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, автор более 100 публикаций, включая три монографии и 30 патентов. Область научных интересов – обработка металлов давлением, физическое материаловедение структурно-фазовых состояний сталей в современных технологиях. Специалист в области организации и модернизации металлургического производства*

4. На макроуровне структура плазменноупрочненного по другим режимам чугуна марки СПХН аналогична чугуна СШХНФ. Поверхностный упрочненный слой состоит из мелкодисперсного ледебурита, мартенсита и остаточного аустенита, а зона термического влияния – из мартенсита, остаточного аустенита и цементита. Проведен сравнительный анализ эволюции структурно-фазовых состояний и дислокационной субструктуры после прокатки термоупрочненной арматуры на литом и плазменноупрочненном валке.



*Обсуждение результатов эксперимента с д.т.н. Л.М. Полторацким*

5. На наноуровне эксплуатация плазменноупрочненного валка из чугуна СПХН сопровождается измельчением (до 5–90 нм) карбидной фазы ледебурита; распадом твердого раствора мартенсита с образованием цементита, располагающегося на дислокациях (2–5 нм), микродвойниках (5–8 нм),

границах кристаллов мартенсита (10–15 нм); преобразованием структуры перлита, заключающееся в полиморфном  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$  превращении с образованием пакетного мартенсита (продольные размеры 200–300 нм, поперечные 20–30 нм), последующий отпуск которого приводит к выделению частиц цементита (5–7 нм) по границам кристаллов.

6. Формирование и распространение трещин при эксплуатации упрочненных валков при прокатке 300 т арматуры сопровождается

проникновением в объем материала кислорода, о чем свидетельствует образование частиц оксидов и оксикарбидов железа со средними размерами 50–10 нм. Послойным ПЭМ анализом в слое, разделяющем зоны оплавления и термического влияния выявлено оплавление и присутствие мартенсита пластинчатой морфологии с частицами цементита размерами 10–25 нм и скалярной плотностью дислокаций  $\langle\rho\rangle = 6,1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ; зерен  $\alpha$ -фазы с дислокационной субструктурой в виде хаоса и сеток и  $\langle\rho\rangle = 2,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , содержащих выделения цементита дендритоподобного и пластинчатого типов; зерен перлита пластинчатой морфологии с высоким уровнем дефектности пластин цементита в виде фрагментов размером 100–150 нм.

7. Термомеханическое упрочнение с горячего проката по схеме прерывистой закалки арматуры большого диаметра сопровождается формированием слоистой структуры, проявляющейся на всех структурно-масштабных уровнях и обусловленной действием различных механизмов полиморфного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения. Воздействие запасенного арматурой тепла приводит: во-первых, к перераспределению и релаксации дислокационной субструктуры и уменьшению  $\langle\rho\rangle$  до  $2,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ; во-вторых, к снижению амплитуды кривизны-кручения феррита до  $0,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ ; в третьих, к разрушению кристаллов мартенсита с образованием субзеренной структуры; в-четвертых, к выделению частиц цементита, морфология и средние размеры которых в наномасштабном диапазоне зависят от типа структуры и вида дефектов, на которых они образовались, расстояния анализируемого слоя до поверхности арматуры.

8. Основными механизмами, ответственными за повышение механических свойств и высокий уровень прочности поверхностного слоя при ускоренном охлаждении фасонного проката из стали 09Г2С, являются субструктурное и деформационное упрочнение, обусловленные формированием кристаллов мартенсита и бейнита. На основании количественных параметров градиентных структурно-фазовых состояний, выявленных методами ПЭМ, и соотношений физического материаловедения оценена величина теоретического предела текучести стали.

9. Установлено, что формирование наноразмерной фазы при термомеханическом упрочнении двутавровой балки из малоуглеродистой стали возможно при реализации процессов, основным элементом которых является преобразование карбидной подсистемы: диспергирование цементитных пластин (5–30 нм) перлитных колоний путем их разрезания движущимися дислокациями, растворение пластин цементита перлитных колоний и повторно выделение на дефектах (5–15 нм), выделение на границах и в объеме кристаллов мартенсита частиц цементита (5–30 нм) при самоотпуске мартенсита, диспергирование структуры пластинчатого перлита (карбидная фаза  $\sim 25$  нм, пластинки  $\alpha$ -фазы  $\sim 70$  нм) при реализации диффузионного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения в условиях высоких температур и степеней деформации.

10. Установленные механизмы и закономерности формирования и эволюции структурно-фазовых состояний при упрочняющих обработках сталей и

сплавов позволили разработать оптимальные технологические режимы плазменной обработки чугунных валков и термомеханического упрочнения арматурного и фасонного проката. Экономический эффект от внедрения результатов работы составил 300 млн. рублей.



*На ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» нам всегда рады*

### ДИССЕРТАЦИИ

1. Ефимов О. Ю. Масштабные уровни эволюции структурно-фазовых состояний при упрочнении стальной арматуры и чугунных валков [Текст] : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 01.04.07 / О.Ю.Ефимов ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк, 2007. – 182 с.

2. Ефимов О. Ю. Формирование и эволюция структуры, фазового состава и свойств сталей и сплавов в современных упрочняющихся технологиях при прокатке : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 01.04.07 / О. Ю. Ефимов ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк, 2013. – 322 л.

3. Юрьев А. Б. Механизмы формирования и эволюции градиентных структурно-фазовых состояний в низколегированных сталях : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 01. 04.07 / А. Б. Юрьев ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк, 2003. – 168 л.

4. Юрьев А. Б. Формирование структуры и свойств железоуглеродистых сплавов при термомеханическом и плазменном упрочнении : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.16.01 / А. Б. Юрьев ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк, 2007. – 310 л.

5. Белов Е.Г. Влияние упрочняющих обработок на структуру и свойства фасонного стального проката и чугунных валков : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.16.01 / Е.Г. Белов ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : СибГИУ, 2010. – 174 л.

6. Костерев В. Б. Механизмы формирования наноразмерных фаз и упрочнения низкоуглеродистой стали при термомеханической обработке : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 01.04.07 / В.Б. Костерев. – Новокузнецк, 2011. – 103 с.

#### МОНОГРАФИИ

1. Бескислотная технология производства проволоки из малоуглеродистой стали / Л.М. Полторацкий, О.Ю. Ефимов, В.Я. Чинокалов, О.Д. Сидорова, В.Е. Громов. – Новокузнецк, СибГИУ, 2008.– 172 с.

2. Влияние внешних энергетических воздействий на структуру, фазовый состав и свойства материалов : материалы международной конференции «Электрон-фононные и спиновые взаимодействия, инициированные быстрыми заряженными частицами, электромагнитными полями, электрическими токами и СВЧ-излучением в макроскопических проявлениях на обычных и наноматериалах» / под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк : СибГИУ, 2012. – 319 с.

3. Ефимов О. Ю. Формирование структуры, фазового состава и свойств сталей и сплавов в упрочняющих технологиях обработки давлением / О.Ю. Ефимов, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов. – Новокузнецк : СибГИУ, 2012. – 344 с.

4. Ефимов О.Ю. Структурно-фазовые состояния и технология производства упрочненной стальной арматуры и чугунных валков / О.Ю. Ефимов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2008. – 300с.

5. Методы исследования микроструктуры и механических свойств металлов и сплавов / Л.М. Полторацкий, А.Б. Юрьев, О.Д. Сидорова, В.Е. Громов ; СибГИУ. – Новокузнецк, 2008. – 162 с.

6. Микрюков В.Р. Физическая природа деградации свойств, фазового состава и дефектной субструктуры арматурной стали при длительной эксплуатации / В.Р. Микрюков, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2006. – 170 с.

7. Плазменное упрочнение высокоуглеродистых сплавов: физическая природа и технология / О.Ю. Ефимов, А.Б. Юрьев, В.Е. Громов, В.Я. Чинокалов, С.В. Коновалов ; СибГИУ. – Новокузнецк, 2009. – 223 с.

8. Структурно-фазовые состояния и дефектная субструктура термомеханически упрочненной малоуглеродистой стали / В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, В.Б. Костерев, О.Ю. Ефимов, С.В. Коновалов. – Новокузнецк, СибГИУ, 2011. – 166 с.

9. Структурно-фазовые состояния и свойства упрочненных стального проката и чугунных валков / В.Е. Громов, О.Ю. Ефимов, В.Б. Костерев, А.Б. Юрьев, В.Я. Чинокалов. – Новокузнецк : Интер-Кузбасс, 2011. – 205 с.

10. Юрьев А.Б. Упрочнение строительной арматуры и прокатных валков / А.Б. Юрьев. – Новосибирск : Наука, 2006. – 227 с.



# Российская Академия Наук

## ПРЕЗИДИУМ

### ПОСТАНОВЛЕНИЕ

17 декабря 2013 г.

Москва

№ 275

О присуждении премии имени И.П.Бардина 2013 года (представление Экспертной комиссии и Бюро Отделения химии и наук о материалах)

Президиум Российской академии наук ПОСТАНОВЛЯЕТ:

Присудить премию имени И.П.Бардина 2013 года в размере 50 000 рублей доктору физико-математических наук Громову Виктору Евгеньевичу (ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»), кандидату технических наук Чинокалову Валерию Яковлевичу и доктору технических наук Юрьеву Алексею Борисовичу (ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат») за работу «Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий упрочнения проката и прокатных валков, обеспечивающих получение высокого уровня прочности и эксплуатационной стойкости».

Президент  
Российской академии наук  
академик



Главный ученый секретарь  
Президиума Российской академии наук  
академик И.А. Соколов

## Глава 7. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, ФАЗОВОГО СОСТАВА И ДЕФЕКТНОЙ СУБСТРУКТУРЫ В ОБЪЕМНО И ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ЗАКАЛЕННЫХ РЕЛЬСАХ

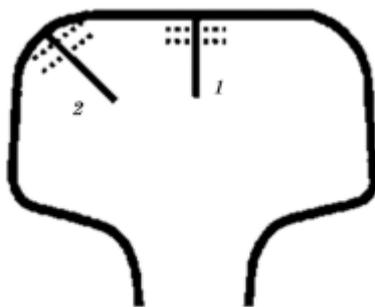
*А рельсы-то, как водится,  
У горизонта сходятся  
(М. Анчаров)*

Несмотря на значительные достижения в развитии технологии термической обработки железнодорожных рельсов, общей теории прокатки, эти вопросы изучены еще недостаточно. Особенно это касается применения новых видов термоупрочнения. Отечественная практика термического упрочнения рельсов в промышленных масштабах на протяжении более чем 30 лет была представлена технологией объемной закалки рельсов в масле с отдельного печного нагрева и последующим высоким отпуском. Данная технология, сыграв свою положительную роль на определенном этапе развития рельсового производства, к настоящему времени полностью себя исчерпала.

Современные мировые тенденции направлены на производство длинномерных (длиной до 120 м) дифференцированно термоупрочненных рельсов. Установление физических механизмов формирования и эволюции структурно-фазовых состояний и дислокационной субструктуры в рельсах при закалке – одна из важнейших задач физического материаловедения. Экспериментальные исследования структур и фазового состава, формирующихся в сечении рельсов при закалке, очень важны для понимания физической природы превращений, поскольку позволяют целенаправленно изменять структуру и эксплуатационные параметры. При этом получение необходимого комплекса высоких прочностных и пластических свойств требует понимания физических механизмов и природы структурно-фазовых изменений на всех масштабных уровнях: от макро- до нано- .

В качестве материала исследования использовали образцы объемнозакаленных 25-метровых рельсов категорий «В», «ИК», «НЭ», а также образцы дифференцированно закаленных воздухом с прокатного нагрева 100-метровых рельсов категории «ДТ350» производства ОАО «ЕВРАЗ – Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат».

Исследование структурно-фазового состояния и дефектной субструктуры рельсов осуществляли методами ПЭМ тонких фольг вдоль двух направлений: по центральной оси и по выкружке в слоях (рисунок 7.1), расположенных на поверхности катания и на расстоянии 2 мм и 10 мм от поверхности катания.



*Рисунок 7.1 – Схема препарирования образца рельса при исследовании методами ПЭМ. Сплошными линиями выделены направления по центральной оси (1) и по выкружке (2); пунктирными линиями условно указаны места расположения слоев металла, использованных для приготовления фольг*

Часть исследований выполнили д.ф.-м.н., профессор Ю.Ф. Иванова из Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук и специалисты-практики – технический директор по транспортному прокату к.т.н. К.В. Волкова и соискатель К.В. Морозова – специалисты по обработке металлов давлением. Со стороны СибГИУ им помогала аспирант К. В. Алсараева. С их помощью и при непосредственном участии были получены результаты по формированию структуры, фазового состава и дефектной субструктуры в объемно и дифференцированно закаленных рельсах.

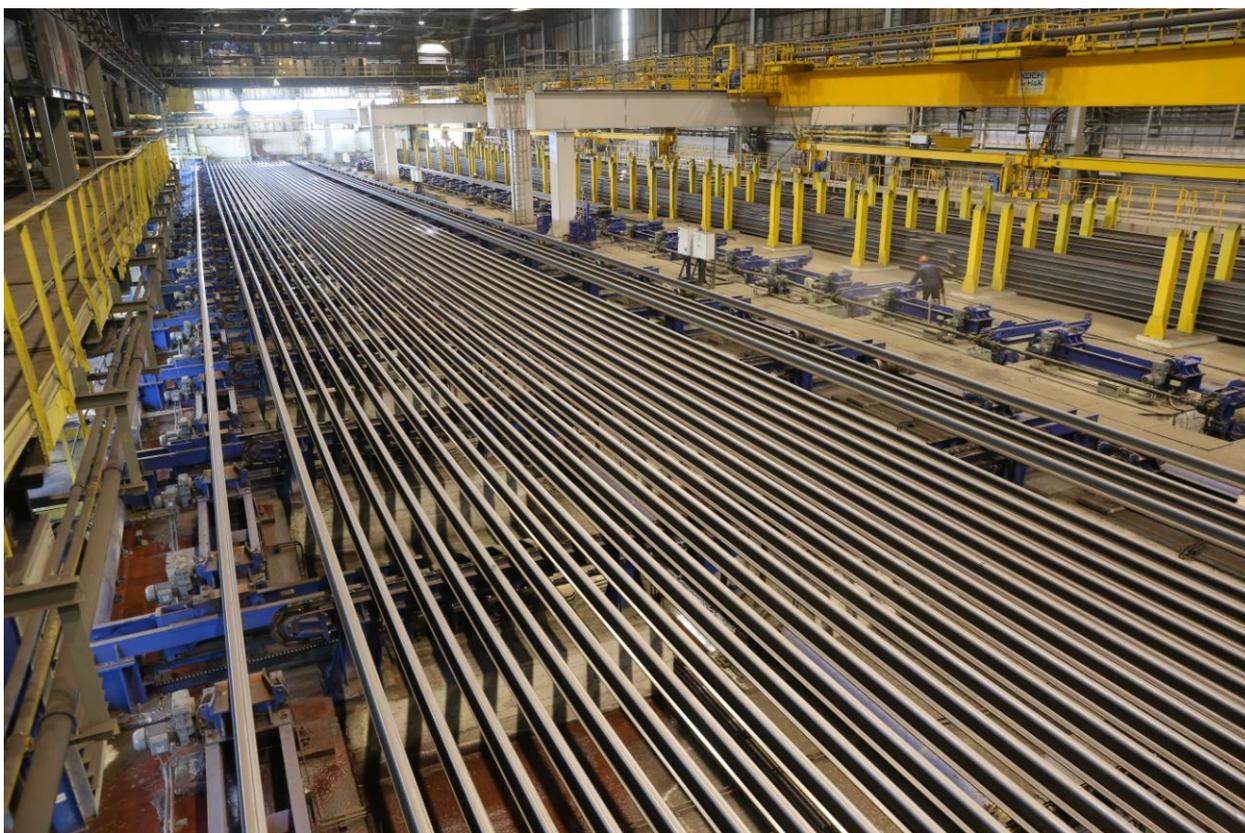


*Иванов Юрий Федорович – профессор, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН, автор более 800 научных работ, 2 патентов РФ и 20 монографий, соавтор научного открытия. Область научных интересов – физическое материаловедение, физика прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий, модификация неорганических материалов пучками заряженных частиц и потоками плазмы*



ванной закалки) в приповерхностном слое стали (слое толщиной ~2 мм) и менее однородная в слое, расположенном на расстоянии ~10 мм от поверхности катания;  
- после объемной закалки структура зерен перлита более однородна (по сравнению со структурой стали, формирующейся в результате дифференцированной закалки) в приповерхностном слое стали (слое толщиной ~2 мм) и менее однородна в слое, расположенном на расстоянии ~10 мм от поверхности катания.

Установлено что закалка стали сопровождается формированием внутренних полей напряжений, величина которых зависит от типа концентратора напряжений. Показано, что наиболее опасным концентратором напряжений, могущим явиться источником микротрещин при эксплуатации изделия из рельсовой стали, являются границы раздела глобулярная частица/матрица.



*«А рельсы-то, как водится, у горизонта сходятся»*

Выявлено, что такие потенциально опасные концентраторы напряжений формируются преимущественно в стали, подвергнутой объемной закалке. Показано, что после объемной закалки структура рельсовой стали менее однородна по количеству концентраторов напряжений, приходящихся на единицу площади материала (по сравнению со структурой рельсовой стали, формирующейся в результате дифференцированной закалки) в приповерхностном слое стали (слое толщиной ~2 мм) и более однородна в слое, расположенном на расстоянии ~10 мм от поверхности катания.



*Технический директор «ЕВРАЗ КАСПИАН СТАЛЬ» К.В. Морозов*

Дальнейшее направление исследований очевидно. Это выяснение природы выхода из строя рельсов при эксплуатации. По сравнению с термообработкой картина поведения рельсов при эксплуатации еще более сложна. Она определяется множеством факторов: природными условиями эксплуатации, грузонапряженностью, скоростным режимом... Эти факторы связаны между собой. Их действие может проявляться как одновременно, так и последовательно. Многочисленные технические условия и стандарты РЖД четко классифицируют признаки выхода рельсов из строя. Но это уже конечная стадия. Желательно выяснить причины. Это архисложная задача. Но ставить и решать ее нужно, поскольку рельсы являются стратегическим продуктом, от надежности которого зависит экономическая безопасность и развитие государства.



*Аспирант К.В. Алсараева*

#### Основные труды по термообработке рельсов

1. Волков К.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Юрьев А.Б., Морозов К.В., Алсараева К.В. Формирование структуры, фазового состава и тонкой субструктуры в дифференцированно закаленных рельсах / *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2014.– Т. 11.– № 1. С. 50–55.

2. Громов В.Е., Волков К.В., Иванов Ю.Ф., Морозов К.В., Коновалов С.В., Алсараева К.В. Структура, фазовый состав и дефектная субструктура рельсов высшей категории качества / *Известия вузов. Физика*. 2014.– № 2.– С. 72–76.

3. Громов В.Е., Волков К.В., Иванов Ю.Ф., Юрьев А.Б., Коновалов С.В., Морозов К.В.. Формирование тонкой структуры в рельсах низкотемпературной надежности / *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2013.– №4.– С. 61–68.

4. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Волков К.В., Морозов К.В., Коновалов С.В., Алсараева К.В.. Формирование градиентов структуры, фазового состава и дефектной субструктуры в рельсах при дифференцированной закалке / *Перспективные материалы*. 2014.– №3.– С. 40–45.

5. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Глезер А.М. и др. Дифференцированная закалка рельсов: структура, фазовый состав и дефектная субструктура поверхностного слоя / *Деформация и разрушение материалов*, 2014.– № 5.– с. 42–46.

6. Громов В.Е., Юрьев А.Б., Морозов К.В., Иванов Ю.Ф., Волков К.В. Микроструктура закаленных рельсов. – Новокузнецк: Изд-во «Полиграфист», 2014. – 214 с.

## Глава 8. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ И ПОВЕДЕНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ СТРУКТУР

*Полезно решать  
дифференциальные  
уравнения  
(И. Ньютон)*

### Роль и значение математического моделирования

Современный этап развития цивилизации основывается на крупномасштабном использовании информационных технологий (ИТ) в различных областях человеческой деятельности. Мы переживаем революционный переход, более существенный, чем книгопечатание. Базовым элементом в ИТ является формализованная модель явлений, процессов или событий. Эта модель для своего формирования требует описания с использованием математического аппарата той или иной предметной области. Таким образом, математизация науки есть веление времени, а не только удобная форма изложения законов.

В документах технологической платформы «Материалы и технологии металлургии» (МТМ) [44] отмечено, что её целью является концентрация финансовых и административных ресурсов, направленных на создание современной отрасли по производству нового поколения материалов металлургии в части разработки и внедрения в серийное производство энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий изготовления и переработки конструкционных и функциональных материалов, а также техническое перевооружение и оснащение металлургических предприятий роботизированным, автоматизированным и компьютеризированным оборудованием для реализации современных технологических процессов на базе цифровых ИТ-технологий и нейронного управления.

Группы технологий, которые предполагается развивать в рамках ТП МТМ:

- разработка теоретических основ, методологий создания материалов и технологий их производства и переработки;
- создание теоретических основ и формирование научных подходов (в том числе на электронном и нейронном уровне), поисковые исследования в области разработки принципиально новых обогатительно-металлургических технологий, конструирования и разработки новых литейных и деформируемых сплавов и сталей, комплексных систем защиты и теплозащитных покрытий с применением компьютерных (ИТ) технологий;
- технологии создания систем цифрового моделирования, расчета, проектирования и реализации современных высокоэффективных технологических процессов, прогнозирования оптимальных свойств, в том числе фазового состава и структуры материалов, новых изделий из сплавов и сталей, технологических параметров их изготовления и переработки для выбора основательно-технологических решений, а также новых методов автоматизированных средств мониторинга технологий, диагностики и неразрушающего контроля материалов и

конструкций с использованием компьютерных (ИТ) методов, совместимых с CAD/CAM/CAE- и PLM-системами;

- разработка нового поколения материалов с повышенным уровнем служебных характеристик;

- создание, с применением компьютерного конструирования, материалов металлургии нового поколения;

- технологии создания с применением компьютерного конструирования сверхлегких, высокожаропрочных (в том числе интерметаллидных, эвтектических, композиционных и естественно-композиционных) никелевых, кобальтовых, титановых, алюминиевых, магниевых, бериллиевых сплавов, включая сплавы на основе РЗМ и цветных металлов, специальные стали и стали массового назначения;

- технологии создания с применением компьютерного моделирования и конструирования, в том числе на электронном и нейронном уровне высокопрочных коррозионно-стойких и теплостойких сталей (в том числе порошковых, аморфных и естественно-композиционных), коррозионностойких, хладостойких и сверхвысокопрочных сталей, включая азотосодержащие, среднеуглеродистых подшипниковых сталей нового поколения (увеличение ресурса работы подшипников не менее чем в 20 раз), сталей массового применения, высокопрочных армированных сталей, а также элементов «сталь-покрытие», металлических приборных материалов (в том числе наноструктурированных) для защиты чувствительных элементов приборных комплексов и биологических объектов от постоянных и переменных магнитных полей;

- технологии создания наноструктурных, нанослойных (ионноплазменных, магнетронных, термо-диффузионных и др.) защитных и упрочняющих покрытий, включая высокопластичные, комплексных теплозащитных покрытий (работоспособных до 1350–1400 °С), включая наносимые магнетронным способом (энергосбережение до 50 раз по сравнению с электроннолучевыми технологиями) с применением компьютерного моделирования и конструирования, в том числе для монокристаллических лопаток и других деталей.

И наконец, человечество вступает в шестой технологический уклад (ТУ) (2010–2050 гг.). Ядро этого ТУ: наноэлектроника, молекулярная и нанофотоника, наноматериалы и наноструктурированные покрытия, нанобиотехнология, наносистемная техника. Ключевой фактор: нанотехнологии, клеточные технологии. Преимущество ТУ по прогнозу будет состоять в резком снижении энергоёмкости и материалоёмкости производства, в конструировании материалов и организмов с заранее заданными свойствами. Для выполнения этих задач использование компьютерного моделирования и конструирования, а значит и математического материаловедения является важным.

Созданием комплекса математических моделей материаловедения занимаются многие коллективы, например [45, 46]. Экспериментальные аспекты процессов создания градиентных структур отражены в работах коллектива научной школы [47–49].

## Математические модели формирования градиентных структурно-фазовых состояний при внешних воздействиях

Начиная с 30-х годов XX века появилось много работ, в которых предлагались методы упрочнения поверхностей (цементация, азотирование, поверхностная закалка и наклеп), благодаря воздействию которых создавались градиентные структурно-фазовые состояния. В настоящее время часть этих методов используются в производстве. Наибольшее распространение получила поверхностная закалка. Решающее значение в этом способе имеет зависимость теплового потока от времени. Наиболее ясную физическую модель градиентной структуры (ГС) при поверхностной закалке предложил выдающийся специалист по рельсам и известный физик-металлург Юрий Вячеславович Грдина [50]. Повышенная твердость поверхностного закаленного слоя простирается на глубину до 15 мм, при этом наблюдается сначала снижение твердости, а затем увеличение ее с максимумом на глубине 7 мм и дальнейшим спадом. Такое немонотонное изменение твердости – немонотонная градиентная структура, по утверждению Ю.В. Грдины, «присуща всем способам поверхностной закалки стали». Утверждение о неизбежной немонотонности на сегодняшний день не бесспорно. Существуют способы, при которых создаются условия формирования монотонных ГС.

Качественное и физическое ясное объяснение немонотонной ГС структуры приводится в [50]. При поверхностном нагреве распределение температуры по глубине к моменту окончания нагрева монотонно спадает от максимального значения на поверхности. При принудительном охлаждении температура на поверхности резко падает. На определенной глубине, где температура при нагреве превышала  $A_{c1}$  могут в зависимости от скорости охлаждения происходить мартенситные, бейнитные или перлитные превращения без самоотпуска. Это объясняет появление максимума в зависимости твердости от глубины. Описанный процесс будем называть схемой Грдины, объясняющей на качественном уровне немонотонную зависимость градиентных свойств.

Анализ поверхностного нагрева – охлаждения, приведенный в кандидатской диссертации В.Д. Сарычева в [51] указывает на возможность четырех типов формирования градиентных структур. Одна из этих схем – схема Грдины, указана выше. Необходимо отметить, что распределение температуры по глубине имеет максимум, при этом левая ветвь характеризует тепловой поток к поверхности  $q_{\text{л}}$ , а правая – отвод тепла в глубину  $q_{\text{п}}$ . По окончании охлаждения за счет внутреннего тепла начинается разогрев поверхности, приводящий к самоотпуску. Существует определенное такое сечение, что правее его происходит только снижение температуры, т.е. вторичного разогрева не происходит. При неглубинном прогреве самоотпуска быть не может, и эта вторая схема всесторонне исследовалась в работах И.Н. Кидина. Третья схема реализуется при  $q_{\text{л}} \gg q_{\text{п}}$ , и в этом случае при условиях глубинного нагрева зависимость температуры от координаты монотонна, и твердость монотонно спадает (схема К.З. Шепеляковского). Все три схемы предполагают, что используется поверхностный разогрев. Существует четвертая схема создания градиентных структур при термообработке, исследованная под руково-

дством К.Ф. Стародубова, где предполагается сквозной нагрев детали и поверхностное охлаждение. В этом случае возможно резкое переохлаждение поверхности с последующим разогревом, в результате чего могут возникать немонотонные градиентные структуры. Также образование немонотонных градиентных структур с участком пониженной твердости возможно при условии воздействия концентрированных потоков энергии на закаленные стали, в которых происходит отпуск закаленной структуры.

### Охлаждение проката

В нашей работе [53] осуществлен подбор параметров охлаждения для математического моделирования охлаждения с самоотпуском, что позволило количественно смоделировать схему Грдины. В этой работе тепловой поток на границе задавался в кусочно-постоянном виде:

$$q(t) = q_1 : 0 < t < \tau_1; \quad q(t) = 0 : \tau_1 < t < \tau_2; \quad q(t) = q_2 : \tau_2 < t < \tau_3, \quad q(t) = 0 : t > \tau_3. \quad (1)$$

Значения тепловых потоков и времена воздействия:  $q_1, \tau_1; \tau_2; q_2, \tau_3$  определялись из сравнения расчетных значений и экспериментально измеренной зависимости температуры от времени на определенном расстоянии от поверхности. Решение этой задачи явилось важным этапом в построении математического моделирования формирования градиентных структур, так как показало, что можно промоделировать немонотонную ГС с помощью выбора параметров в достаточно простой зависимости теплового потока. Не смотря на то что восстановление параметров теплового потока по температурной зависимости относится к классу некорректных задач математической физики (обращение времени в уравнении теплопроводности приводит к неустойчивости), удалось по определенным параметрам в (1) с высокой точностью восстановить температурное поле. Это обстоятельство позволило поставить и решить задачу о распределении температур при прерывистом охлаждении проката в производственных условиях [54]. Это явилось само по себе важным для отработки технологических режимов в промышленной установке прерывистого упрочнения [49], но кроме того явилось базой для разработки модуля по расчету структурно-фазовых превращений [55]. В этой статье получено теоретическое распределение по глубине мартенсита, перлита и бейнита. Они совпадают с соответствующими экспериментальными распределениями. Это направление развивается в настоящее время в проекте ICAMS [45], а также в работах российских исследователей [46].

### Воздействие ЭПО

В продолжение темы моделирования теплофизической ситуации были выполнены работы [56–58] по расчету распределения температур при воздействии электронных пучков на титан и плазматронных струй на чугунные валки. Эти два воздействия по своей технологической сущности отличаются принципиально, однако в математической постановке нет такого различия. Обычно задача о распределении температур при поверхностном нагреве ставится так, что на поверхности

задаётся тепловой поток, который действует определенное время. Затем по глубине проплавления оценивается величина теплового потока. Этот подход является удовлетворительным, когда температура на поверхности не достигает температуры испарения. В случае, когда задается энергия воздействия на единицу площади и время действия, как при двух выше отмеченных способах, то при расчете с использованием теплового потока получается, что на поверхности температура достигает нескольких тысяч градусов. Поэтому пришла мысль о смене типа граничных условий: тепловой поток действует определенное время  $t_1$  до достижения температуры, а затем температура на поверхности задается равной температуре испарения и поддерживается время  $t_2$ . Определять  $t_2$  можно по разному: решить задачу о разлете испаренного вещества, но это сложно, или исходя из энергетических соображений, что было и сделано в [59]. Предложенный подход позволяет проводить анализ экспериментальных данных по ЭПО.

Кроме того при ЭПО возможна генерация термоупругих волн. Учет их мог бы выяснить механизм возникновения внутреннего максимума твердости. Это связано с возникновением максимума сжимающих напряжений на определенной глубине от поверхности. Решение задач динамической термоупругости представляет определенные сложности и в основном осуществляется численно. Не умаляя значения численных решений, хотелось бы получить аналитические выражения для глубины максимума сжимающих напряжений. Имея опыт по аналитическому решению задач динамической теории упругости [60, 61], мы решились обратиться к динамической термоупругости. Так, в [62] поставлена и решена задача о генерации, распространении и отражении термоупругих волн при заданном тепловом воздействии. Здесь получены новые результаты о структуре упругой волны: в процессе её генерации есть участки сжатия и растяжения, обусловленные подъемом и спадом температуры. Экспериментальная интерпретация полученных результатов позволит разобраться в деталях формирования градиентных структур.

Комбинированное воздействие на титан потоком частиц углерода с последующей обработкой электронным пучком является перспективным методом получения покрытий, обладающих высокой твердостью, износостойкостью, прочностью. В ходе такого воздействия происходят процессы внедрения в жидкий титан частиц углерода определенных размеров, растворение углерода в титане с образованием или без образования карбида титана, получение однородного раствора углерода в титане, формирование однородного сплошного слоя карбида титана при охлаждении. Первоначально при направленном электрическом взрыве углеграфитового волокна (УГВ) и взаимодействии этого гетерогенного пароплазменного потока с титаном в модифицированном слое могут наблюдаться участки карбида титана, частицы углерода, окруженные чистым титаном. После электровзрывной обработки (ЭВО) частицы УГВ в титане представляют собой ячейки размерами 20–50 нм, состоящие из частиц углерода размера 5–15 нм. При последующей электронно-пучковой обработке (ЭПО) происходит полное растворение графита, увеличение содержания карбида титана и создание однородных сплошных слоев карбида титана. В результате такого комбинированного воздействия гетерогенная структура превращается в однородный сплошной слой карбида титана.

Гетерогенная структура после ЭВО определяется двумя характерными размерами ячеек, имеющие нано- (50 нм) и микрометровый (10 мкм) масштаб. При воздействии ЭПО материал поверхностного слоя превращается в жидкость и находится в таком состоянии определенное время. За образование однородного слоя может быть ответственен диффузионный перенос в неизотермическом режиме. Диффузионные процессы за время импульса 100 мкс способны к переносу на расстояния 0,5 нм. Следовательно, без дополнительных причин массоперенос за счет диффузии не сможет растворить углерод за время воздействия ЭПО. Возможны две причины, позволяющие продлить время действия диффузии. Первая связана с увеличением времени действия высоких температур на поверхности за счет процессов испарения материала мишени [59]. Вторая причина обусловлена поддержанием высоких температур за счет выделения тепла при образовании карбида и его растворении. Показано, что растворение углеродной частицы размером 10 нм возможно за время 100 мкс. Так как температура в ячейке благодаря охлаждению уменьшается, встает вопрос о правомочности диффузно-реакционного механизма в режиме охлаждения. Для подтверждения решающей роли диффузно-реакционного механизма в формировании однородного слоя проведено компьютерное моделирование кинетики процесса растворения углерода в титане при охлаждении через фазовые переходы: углерод–карбид титана–жидкий раствор углерода в титане. Математическая модель основана на диффузной задаче для двух областей, при этом граничные условия и закон движения границ сформулированы с использованием диаграммы состояния титан – углерод. При этом температура в ячейке однородна, но меняется со временем за счет теплоты превращений и охлаждения ячейки со стороны окружающей среды [63, 64].

### **Фильтрационная модель течения материала**

Физика и механика гетерогенного течения среды начала развиваться с работы Н.Е. Жуковского, когда он предложил заменить поверхностные силы трения между фильтрующей средой и вмещающим каркасом как объемные. С этого момента можно говорить о двух континуумах, которые взаимодействуют между собой. Идея представления среды в виде двух фаз оказалась плодотворной при создании феноменологической модели сверхтекучести, за которую Л.Д. Ландау и получил свою Нобелевскую премию. В 80-х годах физика и механика гетерогенных сред стала мощным разделом естествознания. При развитии теории холодного напыления поднялся вопрос о роли отраженных от поверхности частиц. Учесть это в теоретической модели ранее не представлялось возможным. Сотрудничество с А. П. Труневым позволило по теории возмущений построить модель обтекания клина гетерогенной смесью газ – твердые частицы с учетом отраженных частиц [65]. Лев Борисович Зуев сделал доклад в Сибирском металлургическом институте о так называемых волнах пластичности Зуева–Данилова. Скорость этих волн составляла несколько сантиметров в минуту. Появилась идея об аналогии между пластичностью и распространением возмущений в смеси. В смеси скорость звука может быть на несколько порядков ниже, чем скорость звука в чистых веществах, образующих эту смесь. Эту мысль обсудили с А.П. Труневым. Тогда и появилась идея фильтрационной пластичности. Дальше была математическая техника.

В.А. Петрунин проверял выкладки, работал с литературой и нашел, что идею использовать двухфазность для описания пластичности предложил Эйлиас Айфантис. Была начата работа над получением из теории величин, которые можно измерить: скорость волны и ширина ударного перехода [65]. Возвращению к этой задаче через 20 лет поспособствовала работа Сергея Андреевича Невского, после защиты кандидатской диссертации, в рамках теории пластичности. В процессе осмысления проблем механики и физики гетерогенных сред была получена явная зависимость перемещения от координаты в фильтрационной модели [66]. В этом случае её можно сравнить с экспериментальной зависимостью.

Этот этап имеет свое продолжение. Летом 2013 года в Греции (г. Салоники) состоялась международная конференция НАНО-13.



*Доцент В.Д. Сарычев и соискатель Е.В. Черемушкина после заседаний на фоне Пантеона (Афины). Греция 2013 год*

В её рамках проводился семинар по градиентной теории упругости и пластичности под руководством профессора А. Айфантиса. В.Д. Сарычев и соискатель Е.В. Черемушкина отправились в Грецию для обсуждения с Айфантисом ряда проблем, связанных с двухфазной пластичностью. Состоявшиеся беседы были продуктивны и вызвали интерес у профессора. Были запланированы совместные публикации, отправлена статья для обсуждения.

## Магнитоимпульсное упрочнение металлов

Магнитоимпульсное воздействие на металлы (МИВ) стало применяться учеными школы начиная с 90-х годов с целью упрочнения стальных изделий [67], где используется разряд конденсаторной батареи с током  $\sim 10^6$  А при периоде  $\sim 100$  мкс. В силу бесконтактного воздействия на металлы магнитоимпульсная обработка широко используется при деформировании металлов, она получила свое распространение в промышленности при обработке материалов давлением. В другом крайнем случае параметров (высоких частот и малых токов) МИВ используется при нагреве с целью закалки изделий. Стойкость инструмента, обработанного импульсным магнитным полем напряженностью 100–2000 кА/м (максимальная сила тока в соленоидах 50–2000 А) при длительности импульса 0,1–5,0 с, повышается в 2–4 раза [46]. В этом направлении выполнено небольшое количество работ (Полетаев В.А., г. Иваново; Козлюк А.Ю., г. Барнаул; Алифанов А.В., г. Минск). Использование для создания импульсного магнитного поля конденсаторной батареи приводит к качественно новым эффектам из-за возможности фазовых переходов в поверхностных слоях и создания наноструктурных слоев за счет развития магнито-гидродинамической неустойчивости. Модель нагрузки на тело с градиентной структурой предложена в [68].



*Хорошее настроение после обсуждения модели  
С.А. Невский, В.Д. Сарычев*

## Конвективное течение материала

Первоначальный интерес к теме формирования наноструктурных образований возник при исследованиях воздействия гетерогенной плазмы электрического взрыва проводников на поверхности металлов. При этом образуется характерная градиентная структура. Послойные исследования, выполненные методами электронной микроскопии, выявили слоистое строение по мере удаления от поверхности обработки. Первый наноструктурный слой (I) толщиной  $\sim 1$  мкм контактирует с плазмой набегающего потока. Второй слой (II) со структурой ячеистой кристаллизации имеет размеры ячеек вдоль вертикального направления значительно больше, чем вдоль горизонтального. Третий слой (III) – с примерно равными продольными и поперечными размерами зерен. Четвертый внутренний наноструктурный слой (IV) толщиной  $\sim 1$  мкм. Эти экспериментальные факты, а именно наличие двух нанослоев, стали предметом теоретических исследований. Внешний нанослой можно объяснить значительным теплоотводом и, соответственно, большой скоростью охлаждения. Однако при этом требуется создание определенных условий, чтобы достичь таких больших скоростей охлаждения, что трудно осуществить. Внутренний нанослой в рамках тепловой модели получить не удавалось. Более того, этот слой считался артефактом. Однако в продуктах быстрой закалки из расплава на быстровращающемся диске (спиннинговании) выявляются четыре структурные зоны, описанные в [48]. Зона, прилегающая к закалочной поверхности, или зона замораживания, имеет микродисперсную структуру. Считается, что она образуется в результате множественного зарождения кристаллов. Вторая зона – столбчатых кристаллов – сильно вытянутых зерен. В третьей зоне формируется дендритная или дендритно-ячеистая структура. Четвертая зона – область равноосных случайно ориентированных нанозерен. Возникающая здесь ситуация аналогично выше описанному случаю – возникновению внутреннего нанослоя при воздействии гетерогенной плазмы.

Кроме того, формирование наноразмерных образований при больших пластических деформациях также возникает при сдвиге двух материалов. При детальном микроскопическом исследовании в полосах сдвига были обнаружены наноструктуры [49]. Создание объемно-структурных наноматериалов методами интенсивной пластической деформации используется в промышленных условиях. Приведенный набор экспериментальных данных позволяет судить о появлении наноструктур при сдвиговых течениях. Наноструктуры возникают при деформации в зонах сдвиговых полос, где имеется повышение температуры вплоть до температуры плавления, при этом возникает интенсивный массоперенос в жидких прослойках, там же отмечается, что детали механизма образования наноструктур в зонах сдвиговых полос продолжают уточняться. Несмотря на предпринимаемые усилия, до сих пор остается неясным механизм формирования фрагментации кристаллического материала на сильно разориентированные кристаллические блоки, а также, чем обусловлена повышенная прочность сильнодеформированных металлов и сплавов. На наш взгляд, идея формирования наноструктурных образований в материалах в результате развития неустойчивостей равновесных состояний

в поверхностных слоях сможет внести ясность в механизм фрагментации. Эта идея является новой и до последнего времени не предлагалась.

В работе [70] предложено объяснять первый нанослой на основе механизма развития неустойчивости Кельвина–Гельмгольца (НКГ) в наноразмерном диапазоне при тангенциальном течении плазмы и расплавленного слоя металла. При относительном движении двух сред возникают волны (например, при ветре возникает рябь на воде). Изучение НКГ ведется более ста лет. В линейном приближении об эволюции поверхности раздела получают дисперсионное уравнение, как правило, это трансцендентное алгебраическое уравнение, связывающее инкремент и длину волны. Оно зависит от большого числа параметров, поэтому аналитическую параметризацию удастся провести в редких случаях. Поэтому численно решают дисперсионное уравнение для получения зависимости декремента от длины волны для определенных значений параметров. Максимумы в этой зависимости при положительных значениях инкремента достигаются при определенных длинах волн  $\lambda_{\max}$ . Значит, развитие получают волны и генерируемые ими вихри размером  $\sim \lambda_{\max}$ , а длины волн и, следовательно, другие масштабы не разовьются. Такой подход стандартен в исследовании неустойчивостей. В [69] получено дисперсионное уравнение для полубесконечных слоев вязкой и идеальной жидкостей, моделирующих ветровое взаимодействие плазмы и расплавленного металла, и приведен численный анализ. Управляющим параметром явилась скорость относительного скольжения слоев.

Идея использования этого механизма для второго внутреннего нанослоя (зона IV) была приведена в [70–72]. Там выписана соответствующая математическая модель и показано, что при некоторых условиях возможно два масштаба возникновения неустойчивости в нано- и микро- диапазонах. В этом случае управляющим параметром является толщина верхнего слоя. Почему до настоящего времени никто не анализировал зависимость декремента от длины волны в нанометровых диапазонах и тем самым не предлагал механизм формирования наноструктур на основе развития НКГ? Ответ на этот вопрос можно понять из следующих соображений. Увидеть нано можно в электронный микроскоп, а непосредственно на жидкости проблематично (нужна сильная мотивация, чтобы организовать такие исследования). В застывшем металле можно увидеть наномасштабы вблизи границы разрыва тангенциальной скорости, что и было сделано в предыдущих работах ученых школы. Полученные модели образования наноструктурных состояний при воздействии плазмы на металлы могут быть использованы в поисках других механизмов создания неустойчивости, например, за счет неустойчивости Релея–Тейлора [73].

## Глава 9. ВОСПОМИНАНИЯ О ПОДНЕБЕСНОЙ. ШАГ В БУДУЩЕЕ

*Тот, кто учится не размышляя,  
Впадет в заблуждение.  
Тот, кто размышляет,  
Не желая учиться,  
Окажется в затруднении  
(Конфуций)*

Благодаря исследованиям ученых школы по электропластике и публикациям за рубежом в феврале 2000 года профессор Жэнь Мин Хин пригласил В.Е. Громова в университет Циньхуа, чтобы он рассказал о научной работе СибГИУ, прочитал несколько лекций по электропластическому эффекту. Уже через пять лет, сначала через Интернет, а потом и при личной встрече В.Е. Громов познакомился с профессором Г. Тангом, который был учеником Жэнь Мин Хина. Гоуи Танг – директор Института перспективных материалов университета Циньхуа. Институт находится в наукограде Шеньчжэне, это фактически научный институт послевузовской подготовки. Система послевузовской подготовки в Китае чрезвычайно продумана, что обеспечивает большую эффективность исследований. На базе ведущих университетов страны созданы центры, где проходят обучение в аспирантуре будущие доктора наук. В Китайской Народной Республике, как на Западе, одноступенчатая система присвоения степеней: нет кандидатов наук, есть только степень доктора философии. Обучаясь в аспирантуре, молодые люди занимаются серьезной научной работой. Институты являются мощными научными центрами, хорошо оснащенными современным оборудованием.

Шеньчжэнь – это наукоград, расположенный в восьмидесяти километрах от Гонконга, созданный тридцать лет назад в противовес Гонконгу, когда последний не входил состав Китайской Народной Республики. В городе находятся high-tech-производства и созданы филиалы ведущих университетов Китая. Все условия для работы: отличная инфраструктура, комфортабельные общежития, компактные кампусы, высокий уровень профессорско-преподавательского состава.



*1-я международная конференция по электропластике. Шеньчжэнь, 2007 г.*



*Презентация нашего университета в Институте перспективных материалов*



*На рабочем заседании председательствует Г. Танг*

Институт перспективных материалов – современный, хорошо оснащенный научный центр, одно из направлений которого – повышение пластичности труднодеформируемых легких сплавов за счет электропластического эффекта. С профессором Г. Тангом было три встречи, первая – в 2007 г., когда проводили конференцию на базе его института. После этого была конференция в Москве в ИМАШе, а третья опять состоялась в 2010 году в Шеньчжэне.

Профессор Г. Танг хорошо известен в научном мире, в нем сочетаются топ-менеджер и крупный ученый. Он постоянно в разъездах: Европа, Япония, Тайвань. Все новое, что есть в мировой науке, он реализует в своем научном центре. У него очень молодой работающий коллектив. Суббота – обычный рабочий день в институте, работа не нормирована.

Совместно с китайскими коллегами ученые школы «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий» издали пять книг с трудами прошедших конференций, опубликовали несколько статей. С институтом Г. Танга заключены три договора о научно-техническом сотрудничестве. На стажировке там уже побывали кандидаты наук Роман Филиппев и Оксана Столбоушкина.



*В перерыве между заседаниями 2-й международной конференции.  
Москва. ИМАШ РАН, 2009 г.*



*Участники 3-й международной конференции  
«Фундаментальные и прикладные аспекты действия внешних полей  
на материалы». Шеньчжэнь, 2010 г.*



*Профессор В.Е. Громов*



*Солнечные часы показывают время перерыва между заседаниями*

В 2011 году делегация СибГИУ приняла участие в работе 4-ой, а в 2013 году – 5-ой Российско-китайской конференции в университетском городке Шеньчжэня. В конце 2013 года китайская делегация нанесла ответный визит в г. Томск, где на базе Института физики прочности и материаловедения СО РАН и Сибирского физико-технического института при Томском госуниверситете состоялся 6-ой российско-китайский семинар. Такая тесная международная кооперация реализуется благодаря договору о научно-техническом сотрудничестве, который действует уже более 7 лет. В рамках этого договора были поданы заявки, выиграны и выполнены 3 российско-китайских гранта, финансируемых

РФФИ и Государственным фондом естественных наук Китая. Ко всем международным конференциям были изданы труды на английском языке.

2 октября 2014 года исполняется 60 лет профессору Г. Тангу. Посвященная этой знаменательной дате международная конференция «External Fields (including electropulsing, magnetic, ultrasonic etc. approaches) processing and treatment technology and preparation of nanostructure of metals and alloys» состоится в октябре в Шеньчжэне.

## КОНФЕРЕНЦИИ

1. China – Russia Symposium "Electroplastic effect in metals" (31th May – 4th June 2007, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, China).

2. Electromagnetic fields effect on the structure and characteristics of materials (19–21 May 2009, Institute for Machines Science of the Russian Academy of Sciences Moscow).

3. Fundamental Aspects of External Fields Action on Materials (26–28 May, 2010, Advanced Materials Institute Graduate School at Shenzhen Tsinghua University).

4. Development of advanced materials and processing technology for energy saving applications (1–7 October 2013. Institute of strength physics and materials science SB RAS, Tomsk- Shenzhen).

## ПУБЛИКАЦИИ

1. China-Russia Symposium "Electroplastic effect in metals" / под ред. проф. В.Е. Громова; СибГИУ. – Новокузнецк, 2007. – 320 с.

2. Electromagnetic fields effect on the structure and characteristics of materials / под ред. Ю.В. Баранова, В.Е. Громова, Г. Танга. – Новокузнецк, 2009. – 378 с.

3. Nanomaterials and nanotechnologies : учеб. пособие / А.А Атрошкина, О.А. Филиппева, В.П. Старикова, В.Е. Громов, Е.Ю. Сучкова; СибГИУ. – Новокузнецк, 2010. – 107 с.

4. Fundamental Aspects of External Fields Action on Materials : Book of the International conference articles, 26–28 May, 2010, Advanced Materials Institute Graduate School at Shenzhen Tsinghua University / Ed. by V. Gromov. – Novokuznetsk, 2010. – 613 p.

5. Влияние внешних энергетических воздействий на структуру, фазовый состав и свойства материалов : материалы международной конференции «Электрон-фононные и спиновые взаимодействия, инициированные быстрыми заряженными частицами, электромагнитными полями, электрическими токами и СВЧ-излучением в макроскопических проявлениях на обычных и наноматериалах» / Сиб. гос. индустр. ун-т; под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк : СибГИУ, 2012. – 319 с.

6. Влияние высокоэнергетических воздействий на структуру и свойства конструкционных материалов : Труды II Международной конференции. Т. 1 / Сиб. гос. индустр. ун-т ; под ред. В. Е. Громова. – Новокузнецк, 2013. – 272 с.

7. Влияние высокоэнергетических воздействий на структуру и свойства конструкционных материалов : Труды II Международной конференции. Т. 2 / Сиб. гос. индустр. ун-т ; под ред. В. Е. Громова. – Новокузнецк, 2013. – 298 с.

## Глава 10. С ПРИЦЕЛОМ НА БУДУЩЕЕ

*И не остановиться,  
И не сменить ноги  
(В. Высоцкий)*

23 июня 2015 г. исполняется 85 лет Федеральному государственному бюджетному образовательному учреждению высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет». (Ранее – Сибирский институт чёрных металлов, Сибирский металлургический институт, Сибирская горно-металлургическая академия.) Вместе с институтом как его составная часть была создана кафедра физики. В книге, посвященной 80-летию СибГИУ [74], подробно прослежены пути становления кафедры, ее научной школы. В этой же книге обобщена информация за последние ~ 25 лет – обозримый срок с точки зрения наиболее активной работы преподавателя в вузе [75].

В первые годы становления института (30-е годы XX века) кафедра физики имела одну лабораторию, оборудование было небогатым, штат составлял 4 человека, набор студентов на первый курс – 100 человек. Первым заведующим кафедрой стал Александр Аркадьевич Фрейтаг.

В 1941–1943 гг. в город эвакуирован Московский институт стали (с оборудованием, студентами и профессорско-преподавательским составом). Заведующим кафедрой физики назначен д.ф.-м.н., профессор Александр Петрович Поспелов, окончивший университеты в Варшаве, в Баварии, в Москве.

Наиболее значимые достижения научных исследований на кафедре физики, которая с 2013 года носит имя профессора В.М. Финкеля, за последние 60 лет связаны с именами В.М. Финкеля, Л.Б. Зуева, В.Е. Громова.

За последние 25 лет в научной школе «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий» проделана колоссальная работа. Подведем ее краткие итоги.

### **Диссертации, защищенные в рамках научной школы**

Докторские диссертации. Научный консультант – проф. В.Е. Громов

1999 г. Целлермаер В.Я. Структурно-фазовые превращения в сталях при интенсивной пластической деформации

2000 г. Базайкин В.И. Полуобратный метод анализа технологических операций обработки металлов давлением с использованием несимметричного тензора напряжений

2004 г. Соснин О.В. Эволюция структурно-фазовых состояний в сталях при усталости и механизмы токового импульсного воздействия

2007 г. Юрьев А.Б. Формирование структуры и свойств железоуглеродистых сплавов при термомеханическом и плазменном упрочнении

- 2008 г. Будовских Е.А. Закономерности формирования поверхностных слоев металлов и сплавов при электровзрывном легировании
- 2012 г. Коваленко В.В. Градиентные структурно-фазовые состояния в сталях: способы формирования, масштабы реализации, закономерности
- 2013 г. Ефимов О.Ю. Формирование и эволюция структуры, фазового состава и свойств сталей и сплавов в современных упрочняющихся технологиях при прокатке
- 2013 г. Коновалов С.В. Закономерности влияния электромагнитных полей и токов на пластичность металлов и сплавов

Кандидатские диссертации. Научный руководитель – проф. В.Е. Громов

- 1993г. Целлермаер В.Я. Особенности структуры сталей феррито-перлитного и аустенитного классов после электростимулированной деформации
- 1994 г. Дорофеев В.В. Разработка и усовершенствование калибровок и методов их расчета при продольной прокатке сортовых и фасонных профилей
- 1994 г. Кузнецов В.А. Электротехнический комплекс установок и методическое обеспечение процессов электростимулированной обработки металлов давлением
- 1995 г. Катунин А.И. Усовершенствование ресурсосберегающих технологий производства электростали
- 1995 г. Подборонников С.Ф. Эксплуатационные повреждения и свойства металла паропроводов
- 1997 г. Закиров Д.М. Разработка эффективных технологий изготовления высокопрочного крепежа холодной объемной штамповкой
- 1998 Ерилова Т.В. Влияние импульсов электрического тока на свойства и структуру малоуглеродистых и низколегированных сталей
- 1997 г. Соснин О.В. Диагностика усталостного разрушения сталей и его подавление мощными импульсами электрического тока
- 2000 г. Бердышев В.А. Градиентные структурно-фазовые состояния в рельсовой стали после магнитоплазменного упрочнения и дифференцированной закалки
- 2000 г. Лоскутов Д.Р. Разработка новых способов и совершенствование технологии прокатки листовой стали
- 2001г. Коваленко В.В. Структурно-фазовые превращения нержавеющей стали при электростимулированной малоцикловой усталости
- 2002 г. Гагауз В.П. Формирование и эволюция градиентных структурно-фазовых состояний и механических свойств толстых сварных швов
- 2002 г. Грачев В.В. Формирование градиентных структурно-фазовых состояний в стальных изделиях сложной формы
- 2002 г. Коновалов С.В. Эволюция структурно-фазовых состояний аустенитной стали при усталости с импульсным токовым воздействием

2002 г. Сарычев В.Д. Математическое моделирование процессов образования и поведения градиентных структур в металлах при внешних энергетических воздействиях

2003 г. Юрьев А.Б. Механизмы формирования и эволюции градиентных структурно-фазовых состояний в низколегированных сталях

2004 г. Сучкова Е.Ю. Закономерности эволюции структуры и фазового состава закаленной углеродистой стали при электростимулированной усталости

2004 г. Целлермаер В.В. Структурно-фазовые превращения в феррито-перлитной стали при усталости с импульсным токовым воздействием

2006 г. Багаутдинов А.Я. Закономерности формирования градиентных структурно-фазовых состояний при электровзрывном науглероживании и карбоборировании металлов

2006 г. Микрюков В.Р. Физическая природа деградации механических свойств и структурно-фазовых состояний арматуры при эксплуатации

2007 г. Алешина Е.А. Исследование структуры и фазового состава поверхностного слоя стали Гадфильда после испытаний на трение

2007 г. Ефимов О.Ю. Масштабные уровни эволюции структурно-фазовых состояний при упрочнении стальной арматуры и чугуновых валков

2007 г. Тихонькова О.В. Влияние термической обработки на карбидную подсистему и локализацию углерода в литой среднелегированной конструкционной стали

2007 г. Цвиркун О.А. Формирование нанокompозитных слоев на поверхности железа и никеля при электровзрывном легировании

2007 г. Целлермаер И.Б. Структурно-фазовая модификация углеродистой стали электронным пучком микросекундной длительности

2009 г. Филиппев Р.А. Влияние электрического потенциала и контактной разности потенциалов на пластическую деформацию металлов

2010 г. Ионина А.В. Электронно-пучковая модификация структуры и свойств поверхности электровзрывного легирования стали 45

2010 г. Котова Н.В. Влияние поверхностного электрического потенциала на микротвердость и ползучесть меди

2011 г. Загуляев Д.В. Влияние слабых магнитных полей на микротвердость и ползучесть алюминия

2011 г. Карпий С.В. Особенности поверхностного упрочнения титана при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке

2011 г. Корнет Е.В. Закономерности эволюции фазового состава и дефектной субструктуры закаленной конструкционной стали в условиях деформирования одноосным сжатием

2011 г. Костерев В.Б. Механизмы формирования наноразмерных фаз и упрочнения низкоуглеродистой стали при термомеханической обработке

2011 г. Мартынов А.Н. Исследование атомных механизмов структурных превращений вблизи границ зерен кручения в ГЦК металлах

2012 г. Невский С.А. Влияние слабых электрических потенциалов на релаксацию напряжений в алюминии

2012 г. Романов Д.А. Формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозионностойких покрытий методом электровзрывного напыления

2013 г. Бессонов Д.А. Закономерности влияния электронно-пучковой обработки на структуру и фазовый состав стали 20Х13 при усталости

2013 г. Соскова Н.А. Упрочнение титана ВТ1-0 комплексным электровзрывным легированием и последующей электронно-пучковой обработкой

2014 г. Сизов В.В. Формирование и эволюция структуры и фазового состава нержавеющей стали при электронно-пучковой обработке и многоцикловом нагружении до разрушения

Научный руководитель – Будовских Е.А.

2004 г. Мартусевич Е.В. Формирование строения, структурно-фазовых состояний и свойств зоны двухкомпонентного электровзрывного легирования металлов

2012 г. Ващук Е.С. Формирование структуры и свойств углеродистой стали при электровзрывном боромеднении и электронно-пучковой обработке

2013 г. Бащенко Л.П. Упрочнение поверхности титана при электровзрывном науглероживании и карбоборировании и последующей электронно-пучковой обработке

Научный руководитель – Коваленко В.В.

2005 г. Ивахин М.П. Формирование градиентных структурно-фазовых состояний в аустенитных и мартенситных сталях при усталости и импульсном токовом воздействии

2007 г. Воробьев С.В. Структурно-масштабные уровни многоциклового усталости нержавеющей аустенитной стали при импульсном токовом воздействии

2008 г. Синяев Д.В. Исследование механизмов структурно-энергетических превращений вблизи границ зерен наклона в интерметаллиде  $Ni_3Al$ .

Научный руководитель – Коновалов С.В.

2011 г. Столбоушкина О.А. Закономерности влияния слабого электрического потенциала на эволюцию тонкой структуры и поверхности разрушения алюминия при ползучести

Научный руководитель – Базайкин В.И.

2007 г. Браунштейн О.Е. Усовершенствование технологии прокатки и методов расчета ее усилий при производстве горячекатаного листа

Научный руководитель – Юрьев А.Б.

2009 г. Дорофеев С.В. Совершенствование технологии и разработки новых способов прокатки рельсов

2010 г. Белов Е.Г. Влияние упрочняющих обработок на структуру и свойства фасонного стального проката и чугуновых валков

2014 г. Гришунин В.А. Повышение усталостной долговечности рельсовой стали электронно-пучковой обработкой

Научный руководитель – Целлермаер В.Я.

2002 г. Пискаленко В.В. Эволюция структурно-фазового состояния и механических свойств котельных сталей при эксплуатации

2003 г. Лебошкин Б.М. Эволюция структуры и свойств проволоки с разной подготовкой поверхности при волочении, осадке и объемной штамповке

Научный руководитель – Козлов Э.В.

2004 г. Жулейкин С.Г. Градиентные структуры в перлитной стали при различных способах деформации

2006 г. Климашин С.И. Влияние термической обработки на морфологию мартенсита и эволюцию дефектной структуры литой среднелегированной конструкционной стали

Научный руководитель – Иванов Ю.Ф.

2006 г. Громова А.В. Пути и закономерности эволюции дислокационных субструктур при усталости и волочении

2006 г. Морозов М.М. Закономерности формирования фазового состава и дефектной субструктуры термоупрочненной стали на разных масштабных уровнях

Научный руководитель – Глезер А.М.

2004 г. Семин А.П. Влияние технологии получения, состава и термической обработки на механические свойства аморфных сплавов

2005 г. Алешин Д.М. Особенности механического поведения упорядочивающихся высококремнистых сплавов Fe – Si

Научный руководитель – Колубаев А.В.

2007 г. Алешина Е.А. Исследование структуры и фазового состава поверхностного слоя стали Гадфильда после испытаний на трение /научный консультант – В.Е. Громов

2007 г. Беляев С.А. Изучение процесса изнашивания конструкционных сталей в среде жидкой смазки с добавками нанопорошков пластичных металлов

Научный руководитель – Данилов В.И.

2009 г. Бочкарёва А.В. Локализация пластической деформации и изменения скорости звука в материале с прерывистой текучестью

Научный руководитель – Воронов И.Н.

2002 г. Медведев М.В. Влияние атомного упорядочения на структуру и механическое поведение тройных сплавов на основе железо-кремний

Научный руководитель – Носарев П.С.

1999 г. Будовских Е.А. Формирование структурно-фазового состояния и свойств поверхностных слоев металлов при электровзрывном легировании



*Старший лаборант кафедры физики им. проф. В.М. Финкеля  
Т.Г. Бокова*

## МОНОГРАФИИ

1996

1. Громов В.Е. Электростимулированное волочение : структура и анализ / В.Е. Громов, В.Я. Целлермаер, В.И. Базайкин – М.: Недра, 1996. – 160 с.

2. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов / В.Е. Громов, Л.Б. Зуев, Э.В. Козлов, В.Я. Целлермаер. – М.: Недра, 1996. – 290 с.

1997

3. Громов В.Е. Физика и механика волочения и объемной штамповки / В.Е. Громов, Э.В. Козлов, В.И. Базайкин. – М.: Недра, 1997. – 280 с.

1999

4. Перспективы горно-металлургической индустрии / под ред. С.М. Кулакова, В.Е. Громова. – Новосибирск: Сибирские огни, 1999. – 379 с.

2000

5. Бердышев В.А. Градиентные структурно-фазовые состояния в рельсовой стали / В.А. Бердышев, Э.В. Козлов, В.Е. Громов – М.: Недра, 2000. – 175 с.

6. Семакин Е.В. Надежность элементов автоматики металлургического оборудования / Е.В. Семакин, В.Е. Громов, М.В. Медведев. – Новокузнецк: СибГИУ, 2000. – 88 с.

7. Соснин О.В. Электростимулированная малоцикловая усталость / О.В. Соснин, Э.В. Козлов, В.Е. Громов. – М.: Недра, 2000. – 200 с.

2001

8. Актуальные проблемы производства рельсов / В.Е. Громов, Н.М. Кулагин, С.М. Кулаков, С.Г. Литвин, Л.А. Годик, В.В. Грачев. – Новокузнецк, 2001. – 259 с. – ISBN 5-7806-0074-0.

9. Эволюция дислокационных субструктур при усталости / Н.А. Конева, О.В. Соснин, Л.А. Теплякова, В.Е. Громов, В.В. Коваленко. – Новокузнецк, 2001. – 80 с.

2002

10. Основы технологии обработки поверхности материалов импульсной гетерогенной плазмой / Е.А. Будовских, Е.В. Мартусевич, П.С. Носарев, В.Е. Громов, В.Д. Сарычев. – Новокузнецк, 2002. – 170 с.

11. Соснин О.В. Эволюция структурно-фазовых состояний аустенитных сталей при усталости / О.В. Соснин. – Новосибирск: Наука, 2002. – 211 с.

12. Эволюция структурно-фазового состояния и механических свойств котельных сталей / Э.В. Козлов, Н.А. Конева, С.Ф. Подборонников, В.В. Пискаленко, В.Е. Громов, В.И. Данилов. – Новокузнецк, 2002. – 206 с.

2003

13. Формирование и эволюция структурно-фазовых состояний и свойств сталей в современных технологиях обработки давлением / А.Б. Юрьев, В.Е. Громов, Б.М. Лебошкин, Э.В. Козлов, В.Я. Чинокалов, В.И. Базайкин, Ю.Ф. Иванов, В.Д. Сарычев. – Новосибирск: Наука, 2003. – 347 с.

2004

14. Бурцев Б.И. Структурно-фазовые состояния и свойства металлических систем / Б.И. Бурцев, А.М. Глезер, В.Е. Громов. – Томск : Изд-во НТЛ, 2004. – 170 с.

15. Градиентные структуры в перлитной стали / Э.В.Козлов, В.В. Коваленко, Н.А. Попова, В.Е. Громов, С.Г. Жулейкин. – Новокузнецк: СибГИУ, 2004. – 200 с.

16. Перспективные промышленные технологии и материалы / под ред. В.Е. Громова, С.М. Кулакова. – Новосибирск: Наука, 2004. – 604 с.

17. Усталость сталей при импульсном токовом воздействии / О.В. Соснин, Э.В. Козлов, С.В. Коновалов, В.В. Коваленко, В.Е. Громов, Ю. Ф. Иванов. – Новокузнецк: СибГИУ, 2004. – 464 с.

2006

18. Механическое поведение аморфных сплавов / А.М. Глезер, И.Е. Пермякова, В.Е. Громов, В.В. Коваленко; СибГИУ. – Новокузнецк, 2006. – 416 с.

19. Микрюков В.Р. Физическая природа деградации свойств, фазового состава и дефектной субструктуры арматурной стали при длительной эксплуатации / В.Р. Микрюков, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2006. – 170 с.

20. Особенности структуры и свойств перспективных материалов: к 60-летию проф. В.А. Старенченко / под ред. А.И. Потекаева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – 389 с.: ил.

21. Юрьев А.Б. Упрочнение строительной арматуры и прокатных валков / А.Б. Юрьев. – Новосибирск: Наука, 2006. – 227 с.

2007

22. China-Russia Symposium "Electroplastic effect in metals" / под ред. проф. В.Е. Громова; СибГИУ. – Новокузнецк, 2007. – 320 с.

23. Производство листового проката в валках переменного сечения / О.Е. Браунштейн, В.И. Базайкин, В.Е. Громов, В.В. Дорофеев. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – 116 с.

24. Структура и свойства перспективных металлических материалов: к 60-летию профессора В.Е. Громова / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, С.В. Воробьев, В.Е. Громов, А.А. Викарчук [и др.] ; под ред. А.И. Потекаева. – Томск, 2007. – 579 с.: ил.

25. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк, 2007. – 300 с.

26. Эволюция структуры и свойства металлических материалов / под. ред. А.И. Потекаева. – Томск: НТЛ, 2007. – 444 с.

27. Эволюция фазового состава, дефектной структуры, внутренних напряжений и перераспределение углерода при отпуске литой конструкционной стали / Э.В. Козлов, Н.А. Попова, О.В. Кабалина, С.И. Климашин, В.Е. Громов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2007. – 177 с.

2008

28. Атомные механизмы структурно-энергетических превращений вблизи границ зерен наклона в ГЦК металлах и интерметаллиде Ni<sub>3</sub>Al / Г.М. Полетаев, А.Б. Юрьев, В.Е. Громов, М.Д. Старостенков; СибГИУ. – Новокузнецк, 2008. – 150 с.

29. Бескислотная технология производства проволоки из малоуглеродистой стали / Л.М. Полторацкий, О.Ю. Ефимов, В.Я. Чинокалов, О.Д. Сидорова, В.Е. Громов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2008. – 172 с.

30. Ефимов О.Ю. Структурно-фазовые состояния и технология производства упрочненной стальной арматуры и чугунных валков / О.Ю. Ефимов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2008. – 300 с.

31. Методы исследования микроструктуры и механических свойств металлов и сплавов / Л.М. Полторацкий, А.Б. Юрьев, О.Д. Сидорова, В.Е. Громов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2008. – 162 с.

32. Полторацкий Л.М. Водород в сталях и сплавах (Современное состояние вопроса) / Л.М. Полторацкий, В.Я. Чинокалов, В.Е. Громов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2008. – 162 с.

33. Структурно-масштабные уровни многоциклового усталости сталей при импульсном токовом воздействии / С.В. Воробьев, М.П. Ивахин, Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов, В.Е. Громов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2008. – 270 с.

34. Структурно-фазовые состояния и механические свойства толстых сварных швов / В.П. Гагауз, Э.В. Козлов, В.Е. Громов, В.И. Данилов, Ю.Ф. Иванов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2008. – 130 с.

2009

35. Electromagnetic fields effect on the structure and characteristics of materials / под ред. Ю.В. Баранова, В.Е. Громова, Ю. Танга. – Новокузнецк, 2009. – 378 с.

36. Конкурентоспособность российской черной металлургии в условиях глобализации / И.А. Барнаев, В.В. Пискаленко, Л.М. Полторацкий, В.Е. Громов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2009. – 170 с.

37. Плазменное упрочнение высокоуглеродистых сплавов: физическая природа и технология / О.Ю. Ефимов, А.Б. Юрьев, В.Е. Громов, В.Я. Чинокалов, С.В. Коновалов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2009. – 223 с.

38. Прочность и пластичность металлов при слабых электрических воздействиях / С.В. Коновалов, Р.А. Филиппев, О.А. Столбоушкина, В.И. Данилов, В.Е. Громов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2009. – 180 с.

39. Структура и механические свойства легированных сплавов на основе Fe-Co / А.М. Глезер, Т.М. Ширинов, М.И. Яскевич, В.Е. Громов, С.В. Коновалов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2009. – 142 с.

40. Структурно-фазовые состояния перспективных металлических материалов / отв. ред. В.Е. Громов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2009. – 613 с.

41. Физическая природа формирования и эволюции градиентных структурно-фазовых состояний в сталях и сплавах / В.В. Коваленко, Э.В. Козлов, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2009. – 557 с.

2010

42. Nanomaterials and nanotechnologies / А.А. Атрошкина, О.А. Филиппева, В.П. Старикова, В.Е. Громов, Е.Ю. Сучкова; СибГИУ. – Новокузнецк, 2010. – 107 с.

43. Fundamental Aspects of External Fields Action on Materials: Book of the International conference articles, 26-28 May, 2010, Advanced Materials Institute Graduate School at Shenzhen Tsinghua University / Ed. by V. Gromov. – Novokuznetsk, 2010. – 613 p.

44. Закаленная конструкционная сталь: структура и механизмы упрочнения / Ю.Ф. Иванов, Е.В. Корнет, Э.В. Козлов, В.Е. Громов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2010. – 174 с.

45. Нано: структуры, материалы и технологии / Е.А. Будовских, В.Е. Громов, Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, О.И. Нохрина, Т.Н. Осколкова, В.Я. Чинокалов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2010. – 201 с.

46. Структура, фазовый состав и свойства титана после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки: монография / Ю.Ф. Иванов, С.В. Карпий, М.М. Морозов, Н.Н. Коваль, Е.А. Будовских, В.Е. Громов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2010. – 173 с.

47. Структурно-фазовые состояния и дислокационная субструктура Al при ползучести / О.А. Столбоушкина, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2010. – 125 с.

2011

48. Влияние электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов / Сиб. гос. индустр. ун-т; под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: СибГИУ, 2011. – 229 с.

49. Структурно-фазовые состояния и дефектная субструктура термомеханически упрочненной малоуглеродистой стали / В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, В.Б. Костерев, О.Ю. Ефимов, С.В. Коновалов; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк, 2011. – 166 с.: ил. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – ISBN 9785990240858.

50. Структурно-фазовые состояния и свойства упрочненного стального проката и чугуновых валков / В.Е. Громов, О.Ю. Ефимов, В.Б. Костерев, А.Б. Юрьев, В.Я. Чинокалов. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2011. – 205 с. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – ISBN 9785990240834.

51. Усталостная долговечность стали мартенситного класса, модифицированной высокоинтенсивными электронными пучками / Ю.Ф. Иванов, Д.А. Бессонов, С.В. Воробьев, В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Н.Н. Коваль; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2011. – 258 с.: ил. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – ISBN 9785905647017.

52. Физические основы повышения усталостной долговечности нержавеющей сталей / Ю.Ф. Иванов, С.В. Воробьев, С.В. Коновалов, В.Е. Громов, Н.Н. Коваль; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк, 2011. – 302 с.: ил. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – ISBN 9785990240841.

53. Формирование структурно-фазовых состояний металлических сплавов при магнитно-импульсной обработке / В.Л. Володин, О.Л. Хасанов, Т.В. Володин, В.Е. Громов, С.В. Коновалов; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: СибГИУ, 2011. – 219 с.: ил. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – ISBN 9785990240872.

54. Формирование структурно-фазовых состояний металлов и сплавов при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке / Е.А. Будовских, Е.С. Ващук, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Н.Н. Коваль, Т.Н. Осколкова, Д.А. Романов, В.Д. Сарычев, С.Ю. Филимонов; под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк, 2011. – 211 с.: ил. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – ISBN 9785990240865.

2012

55. Famous Scientists in Physics : учебное пособие для вузов / О.А. Семина, В.Е. Громов, А.П. Семин [и др.]; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: СибГИУ, 2012. – 263 с. – Библиогр.: с. 257–258. – ISBN 9785917970998.

56. Виктор Евгеньевич Громов : библиографический указатель / Сиб. гос. индустр. ун-т ; сост. Т.Г. Бокова. – Новокузнецк: СибГИУ, 2012. – 292 с.

57. Влияние внешних энергетических воздействий на структуру, фазовый состав и свойства материалов: материалы международной конференции «Электрон-фононные и спиновые взаимодействия, инициированные быстрыми заряженными частицами, электромагнитными полями, электрическими токами и СВЧ-излучением в макроскопических проявлениях на обычных и наноматериалах» / Сиб. гос. индустр. ун-т; под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: СибГИУ, 2012. – 319 с.: ил. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения).

58. Ефимов О. Ю. Формирование структуры, фазового состава и свойств сталей и сплавов в упрочняющих технологиях обработки давлением / О.Ю. Ефимов, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: СибГИУ, 2012. – 344 с.: ил. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – Библиогр.: с.340–344. – ISBN 9785905647031.

59. Мы вспоминаем все сначала / Сиб. гос. индустр. ун-т; под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: СибГИУ, 2012. – 199 с.: ил. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения).

60. Наноматериалы : структура, свойства, применение / А.М. Глезер, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Ю.П. Шаркеев; ЦНИИЧМ им. И.П. Бардина, Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2012. – 422 с.: ил. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – ISBN 9785990240896.

61. Усталость сталей, модифицированных высокоинтенсивными электронными пучками / В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, С. В. Воробьев [и др.]; под ред. В. Е. Громова, Ю. Ф. Иванова; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: СибГИУ, 2012. – 402 с.: ил. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – Библиогр.: с.398. – ISBN 9785905647024.

62. Электронно-пучковая модификация структуры и свойств стали / В.А. Гришунин, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Ю.А. Денисова ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: СибГИУ, 2012. – 307 с.: ил. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – Библиогр.: с. 294–307. – ISBN 9785917971018.

2013

63. Famous Inventors and Scientists in Physics: учебное пособие для вузов / О.А. Семина, Н.С. Клименко, А.П. Семин, В.Е. Громов, С.В. Коновалов ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Кемерово : Кузбассвузиздат, 2013. – 355 с. – Библиогр. : с. 347–348. – ISBN 9785202011542.

64. Famous Inventors and Scientists in Physics : учебное пособие для вузов / О.А. Семина, Н.С. Клименко, А.П. Семин, В.Е. Громов, С.В. Коновалов; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: СибГИУ, 2013. – 355 с. – Библиогр.: с. 347–348. – ISBN 9785917971100.

65. Влияние высокоэнергетических воздействий на структуру и свойства конструкционных материалов: Труды II Международной конференции. Т. 1 / Сиб. гос. индустр. ун-т; под ред. В. Е. Громова. – Новокузнецк, 2013. – 272 с.: ил. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения).

66. Влияние высокоэнергетических воздействий на структуру и свойства конструкционных материалов: Труды II Международной конференции. Т. 2 / Сиб. гос. индустр. ун-т; под ред. В. Е. Громова. – Новокузнецк, 2013. – 298 с.: ил. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения).

67. Коновалов С. В. Влияние электромагнитных полей и токов на пластическую деформацию металлов и сплавов / С. В. Коновалов, В. Е. Громов, Ю.Ф. Иванов; Сиб. гос. индустр. ун-т, Институт сильноточной электроники СО РАН. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2013. – 292 с.: ил. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – Библиогр.: с. 238–292. – ISBN 9785905647079.

68. Повышение усталостной долговечности рельсовой стали электронно-пучковой обработкой / К.В. Волков, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, В.А. Гришунин. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2013. – 225 с. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения).

2014

69. Микроструктура закаленных рельсов / В.Е. Громов, А.Б. Юрьев, Ю.Ф. Иванов, К.В. Морозов, К.В. Волков.– Новокузнецк: Полиграфист, 2014. – 215 с. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения).

70. Физическая природа упрочнения поверхностных слоев титановых сплавов при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке / С.В. Райков, Е.А. Будовских, В.Е. Громов, Е.С. Ващук, Ю.Ф. Иванов. – Новокузнецк: Полиграфист, 2014. – 365 с. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения).

Ученые школы с оптимизмом смотрят в будущее и надеются, что их опыт и знания дадут импульс новым научным направлениям:

### **Природа живучести рельсов**

В одной из предыдущих глав рассмотрены результаты природы структурно-фазовых превращений, происходящих при термообработке рельсов. В первую очередь были проанализированы дифференцированно закаленные рельсы, подвергнутые наиболее перспективному и распространенному в последнее время способу упрочнения. По сравнению с термообработкой картина поведения рельсов при эксплуатации еще более сложна. Она определяется, как отмечалось ранее, множеством факторов: природными условиями эксплуатации, грузонапряженностью, скоростным режимом.... Эти факторы связаны между собой. Их действие может проявляться как одновременно, так и последовательно. Многочисленные технические условия и стандарты РЖД четко классифицируют признаки выхода рельсов из строя. Но это уже конечная стадия жизни рельсов. Как развивалась болезнь, повлекшая летальный исход, желательно выяснить. Это – архисложная задача. Но ставить и решать ее нужно уже сейчас, поскольку рельсы являются стра-

тегическим продуктом, от надежности которого зависит экономическая безопасность и развитие государства.

### **Электровзрывное легирование редкоземельными элементами**

В настоящее время в научной школе начаты работы по ЭВЛ поверхности титановых сплавов с иттрием и другими редкоземельными элементами. Перспективность этого направления обусловлена тем, что промышленные и новые титановые сплавы с эвтектоидообразующими элементами – кремнием, железом, марганцем, медью, иттрием, гадолинием и др. – содержат эти компоненты в небольших количествах (0,2–2 %), поэтому их отрицательное влияние на литейные свойства сплавов невелико. Эвтектика образуется лишь при высоких концентрациях второго элемента, значительно превосходящих максимальные пределы легирования промышленных титановых сплавов. Структура промышленных титановых сплавов обычно состоит из смеси двух твердых растворов на основе  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз, иногда с небольшим количеством интерметаллидных фаз. Например, эвтектическая концентрация в системе Ti–Si соответствует 8,5 % Si, в то время как максимальное содержание этого элемента в промышленных сплавах не превышает 0,3 %. В двойных сплавах титана с другими элементами эвтектические концентрации еще выше. Так, в системе Ti–Mn эвтектическая концентрация составляет 42,5 %, а предельная концентрация Mn в промышленных титановых сплавах обычно не более 2 %. Импульсный характер ЭВЛ, обеспечивающий кристаллизацию зоны легирования со скоростями порядка  $10^5$ – $10^7$  К/с, позволяет сформировать мелкодисперсную эвтектическую структуру, обладающую высокими эксплуатационными свойствами, такими как повышенная микротвердость, высокая износостойкость, низкий коэффициент трения, а также высокая термическая стабильность.

### **Повышение износостойкости поверхности сталей и сплавов наплавкой порошковой проволокой**

Для защиты металлов и сплавов от изнашивания, коррозии, высокотемпературного окисления и других внешних воздействий используются плазменные, лазерные, электронно-лучевые и другие методы нанесения покрытий с высоким уровнем требуемых свойств. Однако, как правило, они не позволяют обеспечить износостойкость поверхностей ковшей экскаваторов, кузовов самосвалов и других деталей и конструкций при интенсивных нагрузках. Одним из простых и эффективных методов повышения их прочности и долговечности является электродуговая наплавка порошковой проволокой, которая применяется на предприятиях всех отраслей промышленности для защиты от разрушения деталей и узлов, в частности, от абразивного изнашивания, для предэксплуатационного упрочнения и изготовления биметаллических (двухслойных) материалов. За счет содержащихся в порошковой проволоке добавок легирующих элементов обеспечивается надежная защита расплавленного металла от воздействия воздуха и высокие механические свойства покрытий. Электродуговая наплавка приводит к кратному увеличению износостойкости и микротвердости поверхности стали.

## **Повышение эксплуатационных свойств электрических контактов при формировании электроэрозионностойких и износостойких композитных покрытий**

Одним из перспективных направлений, развиваемых в рамках научной школы «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий» является направление электровзрывного напыления (ЭВН) покрытий электротехнического назначения. Такие покрытия формируют для повышения электроэрозионной стойкости, износостойкости электрических контактов, работающих в условиях электрической эрозии, а также для снижения контактного сопротивления. Такие покрытия могут быть получены с использованием фольг и порошков. Примером формирования покрытий с использованием фольг является напыление медных покрытий на поверхности контакта кабельных наконечников, выполненных из алюминия. Максимальная площадь обрабатываемой поверхности составляет 30 см<sup>2</sup>. Использование этих наконечников с напыленным медным покрытием позволяет увеличить их долговечность. Чередующееся напыление слоев молибдена и меди позволяет получить не только единичный слой покрытия, как в случае с наконечником, но уже и композиционные покрытия со слоистой структурой. Эти покрытия представляют собой чередующиеся слои молибдена и меди. Медь обладает высокой электропроводностью, а молибден – высокой электроэрозионной стойкостью. Толщина слоев меди и молибдена может задаваться с учетом требований эксплуатации электрических контактов. Границы единичных слоев меди и молибдена имеют волнообразный рельеф. Его образование происходит по причине одновременного термического и силового воздействия плазменной импульсной струи на поверхность подложки, которая нагревается до температуры плавления. Поэтому эти покрытия обладают высокой адгезией. Аналогичные покрытия со слоистой структурой получены для системы W–Cu.

В области взрыва фольги можно также помещать порошковые навески того или иного вещества, которые переносятся на облучаемую поверхность. Например, если разметить на медной фольге порошок вольфрама или молибдена, то будут формироваться композиционные покрытия с наполненной, а по-другому – дисперсно-упрочненной структурой. Такая структура представляет собой металлическую матрицу с расположенной в ней упрочняющими включениями – в рассматриваемом случае это включения вольфрама или молибдена в медной матрице. Размер этих включений начинается от нескольких нанометров. Получаемые покрытия относятся к наноматериалам, а технология ЭВН – к нанотехнологиям.

Для электрических контактов силового шахтного оборудования помимо электроэрозионной стойкости требуется повысить износостойкость покрытий систем Mo–Cu и W–Cu. Повышение износостойкости достигается синтезом при напылении карбидов молибдена или вольфрама путем размещения в области взрыва помимо порошка вольфрама порошка углерода. При напылении вольфрам или молибден взаимодействуют с углеродом, в результате чего формируются износостойкие карбиды молибдена или вольфрама.

Требованием этих электрических контактов также отвечают покрытия, полученные с использованием порошков готовых соединений, например, диборида титана.

### **Усталость легких сплавов**

Используемые в авиастроении изделия из легких сплавов – силуминов – эксплуатируются в режимах усталостного нагружения. Поэтому принципиально важно продлить их ресурс. Комплексные исследования по установлению физической природы влияния электронно-пучковой обработки на формирование и эволюцию структуры и фазового состава силуминов при усталости помогут решить эту проблему.

В результате этих исследований методом планирования эксперимента будут оптимизированы режимы электронно-пучковой обработки, обеспечивающие существенное повышение ресурса выносливости образцов. Будут исследованы структура, фазовый состав, дефектная субструктура в исходном состоянии и их эволюция в процессе усталостных испытаний в стандартных условиях и после электронно-пучковой обработки в различных режимах. Будут выяснены механизмы разрушения силуминов, обработанных электронными пучками в различных режимах, при многоциклового усталости. Будут выявлены закономерности формирования градиента параметров зеренной и субзеренной структуры в зоне разрушения при усталости и проведен анализ факторов, ответственных за повышение усталостной долговечности стали.

### **Моделирование физических и технологических процессов**

1. Использование магнито-импульсного воздействия (МИВ) на металлы приводит к расплавлению тонкого слоя металла до 100 мкм, а электромагнитные силы приведут при некоторых условиях к развитию неустойчивости и возникновению вихревых образований. Проблема состоит в том, что необходимо теоретически и экспериментально определить условия формирования наноструктур. Для этого необходимо провести теоретические и экспериментальные исследования:

- создать модель и программу расчетов тепловых процессов при магнито-импульсном воздействии на металлы;
- в рамках модели магнитной гидродинамики получить дисперсионное уравнение для слоя конечной толщины со свободной поверхностью и построить зависимость декремента от длины волны для различных параметров;
- провести параметрический анализ дисперсионного уравнения в наноразмерном диапазоне длин волн;
- создать программу расчетов по развитию неустойчивости в нелинейном случае в нанодиапазонах;
- с помощью установки МИВ провести серию экспериментов на титане;
- провести исследование полученных градиентных структур (микротвердость, СЭМ и ПЭМ).

2. При воздействии гетерогенной плазмы электрического взрыва проводника в режиме создания покрытия (ЭПО), возникают неустойчивости в поле ускоре-

ний – неустойчивость Релея–Тейлора с масштабом 10–20 мкм. Проблема состоит в том, чтобы экспериментально выявить наноразмерные структуры на границе контакта и построить математическую модель неустойчивости Релея–Тейлора в наноразмерном диапазоне, аналогично неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. Для этого необходимо:

- построить математическую модель спиннингования для параметризации нанослоев и создать установку с технологическими параметрами, позволяющими создание ситуации, когда нанослой сомкнется и образует сплошной нанослой. Это позволит решить большой ряд технологических задач.

- создать задел для формулировки теории больших пластических деформаций на основе использования предложенной модели неустойчивости сдвиговых течений в наноразмерных масштабах совместно с филь-трационной моделью.

- создать комплекс расчетных программ для моделирования структурно-фазовых превращений для эвтектоидных сталей при водовоздушном охлаждении.

- для моделирования процессов при слабых электромагнитных полях построить модель неустойчивости электронной жидкости в двойном электрическом слое и при контакте медь–алюминий.



*д.т.н., доцент Е.А. Будовских, д.ф-м.н., профессор В.Е. Громов,  
д.т.н., доцент С.В. Коновалов*

**ВЕДУЩИЕ УЧЕНЫЕ ШКОЛЫ И ИХ РАБОТЫ В E-LIBRARY  
НА 01.01.2014**

Ф.И.О.	Число публикаций автора	Суммарное число цитирований автора	Индекс Хирша
Громов Виктор Евгеньевич	771	1981	12
Будовских Евгений Александрович	215	187	9
Коновалов Сергей Валерьевич	334	568	10
Иванов Юрий Федорович	748	6713	33
Воробьев Сергей Владимирович	73	171	5
Чинокалов Валерий Яковлевич	100	125	5
Юрьев Алексей Борисович	200	274	8

**Распределение публикаций по годам**

Ф.И.О.	Годы								
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Громов Виктор Евгеньевич	37	50	42	51	55	67	81	91	75
Будовских Евгений Александрович	11	15	10	11	16	24	32	46	33
Коновалов Сергей Валерьевич	11	12	23	37	44	48	45	26	37
Воробьев Сергей Владимирович	5	13	3	2	2	6	20	13	9
Чинокалов Валерий Яковлевич	6	13	13	11	10	12	12	4	2
Юрьев Алексей Борисович	16	18	8	20	29	36	23	7	4

# НАУЧНОЕ ОТКРЫТИЕ

Международная академия авторов научных открытий и изобретений  
на основании результатов научной экспертизы  
заявки на открытие № А-585 от 9 июля 2013 г.

ЗАРЕГИСТРИРОВАЛО НАУЧНОЕ ОТКРЫТИЕ  
(ДИПЛОМ № 460)

*Авторы открытия:*

**ГРОМОВ ВИКТОР ЕВГЕНЬЕВИЧ**  
**ИВАНОВ ЮРИЙ ФЕДОРОВИЧ**  
**КОНОВАЛОВ СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ**  
**ВОРОБЬЕВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**  
**СИЗОВ ВАСИЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ**

*Приоритет открытия:* 18 октября 2010 г.

На основании установленных в соответствии с действующим законодательством правовых положений Устава Международная академия авторов научных открытий и изобретений выдала настоящее свидетельство на открытие «*Явление увеличения усталостной долговечности сталей под воздействием низкоэнергетических сильноточечных электронных пучков*»

**ФЕДЕРАЛЬНОМУ ГОСУДАРСТВЕННОМУ  
БЮДЖЕТНОМУ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМУ УЧРЕЖДЕНИЮ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»**

Президент Российской академии  
естественных наук



О.Л. Кузнецов

Президент Международной академии  
авторов научных открытий и изобретений



В.В. Потоцкий

« 17 » 9 октября 2013 г.

г. Москва. Регистрационный № 585

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Вакс, В.Г.** Упорядочивающиеся сплавы: структуры, фазовые переходы, прочность [Текст] / В.Г. Вакс // Соросовский Образовательный Журнал . – 1997. – № 3. – С. 115–123.
2. **Штремель, М.А.** Разрушение [Текст] / М.А. Штремель // Соросовский Образовательный Журнал. – 1997. – № 4. – С. 91–98.
3. **Спицын, В.И.** Электропластическая деформация металлов [Текст] / В.И.Спицын, О.А. Троицкий. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
4. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов [Текст] / В.Е. Громов [ и др.]. – М.: Недра, 1996. – 290 с.
5. **Батаронов, И.Л.** Механизмы электропластичности [Текст] / И. Л. Батаронов // Соросовский Образовательный Журнал. – 1999. – № 10. – С. 93–99.
6. **Зуев, Л.Б.** Электрические поля и пластичность кристаллов [Текст] / Л.Б. Зуев // Соросовский Образовательный Журнал. – 1998. – № 9. – С. 92–95.
7. **Зуев, Л.Б.** Верь сам в себя... / Л. Б. Зуев. – Томск: Изд-во НТЛ, 2012.– 172 с.
8. **Зуев, Л.Б.** Физика электропластичности щелочно-галлоидных кристаллов / Л. Б. Зуев. – Новосибирск: Наука, 1990. – 118 с.
9. **Громов, В.Е.** О механизмах влияния электрического поля на подвижность дислокаций в щелочно-галлоидных кристаллах [Текст]: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Громов Виктор Евгеньевич. – Томск, 1975.
10. **Громов, В.Е.** Закономерности электростимулированной пластичности металлов и сплавов [Текст]: автореф. дис. ... д-р. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Громов Виктор Евгеньевич. – Томск, 1992.
11. **Кузнецов, В.А.** Электротехнический комплекс установок и методического обеспечения процессов электростимулированной обработки металлов давлением. [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Кузнецов Владимир Александрович. – Новокузнецк, 1994.
12. **Ерилова, Т.В.** Влияние импульсов электрического тока на свойства и структуру малоуглеродистых и низколегированных сталей [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Ерилова Татьяна Васильевна. – Новокузнецк, 1998.
13. **Громов, В.Е.** Физика и механика волочения и объемной штамповки [Текст] / В.Е. Громов, Э.В. Козлов, В.И. Базайкин. – М.: Недра, 1997. – 280 с.
14. **Бердышев, В.А.** Градиентные структурно-фазовые состояния в рельсовой стали [Текст] / В.А. Бердышев [и др.]. – М.: Недра, 2000. – 175 с.
15. **Соснин, О.В.** Электростимулированная малоцикловая усталость [Текст] / О.В. Соснин, Э.В. Козлов, В.Е. Громов. – М.: Недра, 2000. – 200 с.

16. Эволюция дислокационных субструктур при усталости [Текст] / Н.А. Конева [и др.]. – Новокузнецк, 2001. – 80 с.
17. **Соснин О.В.** Эволюция структурно-фазовых состояний аустенитных сталей при усталости [Текст] / О.В. Соснин. – Новосибирск: Наука, 2002. – 211 с.
18. Эволюция структурно-фазового состояния и механических свойств котельных сталей [Текст] / Э.В. Козлов [и др.]. – Новокузнецк, 2002. – 206 с.
19. Формирование и эволюция структурно-фазовых состояний и свойств сталей в современных технологиях обработки давлением [Текст] / А.Б. Юрьев [и др.]. – Новосибирск: Наука, 2003. – 347 с.
20. Градиентные структуры в перлитной стали [Текст] / Э.В.Козлов, [и др.]. – Новокузнецк: СибГИУ, 2004. – 200 с.
21. Усталость сталей при импульсном токовом воздействии [Текст] / О.В. Соснин [и др.]. – Новокузнецк: СибГИУ, 2004. – 464 с.
22. Эволюция фазового состава, дефектной структуры, внутренних напряжений и перераспределение углерода при отпуске литой конструкционной стали [Текст] / Э.В. Козлов [и др.]. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – 177 с.
23. Структурно-фазовые состояния и механические свойства толстых сварных швов [Текст] / В.П. Гагауз [и др.]. – Новокузнецк: СибГИУ, 2008. – 130 с.
24. Физическая природа формирования и эволюции градиентных структурно-фазовых состояний в сталях и сплавах [Текст] / В.В. Коваленко [и др.]. – Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – 557с.
25. Закаленная конструкционная сталь: структура и механизмы упрочнения [Текст] / Ю.Ф. Иванов, Е.В. Корнет, Э.В. Козлов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: СибГИУ, 2010. – 174 с.
26. **Муравьёв, В.В.** Скорость звука и структура сталей и сплавов [Текст] / В.В. Муравьёв, Л.Б. Зуев, К.Л. Комаров. – Новосибирск: Наука, 1996. – 184 с.
27. **Соснин, О.В.** Влияние импульсов электрического тока на свойства и структуру малоуглеродистых и низколегированных сталей. Диагностика усталостного разрушения сталей и его подавление мощными импульсами электрического тока [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Соснин Олег Валерьевич. – Новосибирск, 1999.
28. **Коваленко, В.В.** Структурно-фазовые превращения в нержавеющей стали при электростимулированной малоцикловой усталости [Текст]: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / Коваленко Виктор Викторович. – Барнаул, 2001.
29. **Коновалов, С.В.** Эволюция структурно-фазовых состояний аустенитной стали при усталости с импульсным токовым воздействием [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Коновалов Сергей Валерьевич. – Новокузнецк, 2002.

30. **Сучкова, Е.Ю.** Закономерности эволюции структуры и фазового состава закаленной углеродистой стали при электростимулированной усталости [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Сучкова Елена Юрьевна. – Новокузнецк, 2004.

31. **Целлермаер, В.Я.** Особенности структуры сталей феррито-перлитного и аустенитного классов после электростимулированной деформации [Текст] : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Целлермаер Владимир Яковлевич. – Новокузнецк, 1993.

32. **Целлермаер, В.В.** Структурно-фазовые превращения в феррито-перлитной стали при усталости с импульсным токовым воздействием [Текст] / автореф. дис. ... канд. техн. наук / Целлермаер Владимир Владимирович. – Новокузнецк, 2004.

33. **Ивахин, М.П.** Формирование градиентных структурно-фазовых состояний в аустенитных и мартенситных сталях при усталости и импульсном токовом воздействии [Текст] / автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ивахин Максим Петрович. – Новокузнецк, 2005.

34. **Соснин, О.В.** Эволюция структурно-фазовых состояний в сталях при усталости и механизмы токового импульсного воздействия [Текст] / автореф. дис. ... д-р. физ.-мат. наук / Соснин Олег Валерьевич – Барнаул, 2004.

35. **Коваленко, В.В.** Градиентные структурно-фазовые состояния в сталях: способы формирования, масштабы реализации, закономерности [Текст] / автореф. дис. ... д-р. физ.-мат. наук / Коваленко Виктор Викторович. – Барнаул, 2012.

36. **Коновалов, С.В.** Закономерности влияния электромагнитных полей и токов на пластичность металлов и сплавов [Текст] / автореф. дис. ... д-р. техн. наук / Коновалов Сергей Валерьевич. – Новокузнецк, 2013.

37. **Панин, В.Е.** Структурные уровни деформации твердых тел [Текст] / В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев. – Новосибирск: Наука, 1985. – 254 с.

38. **Лихачев, В.А.** Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации [Текст] / В.А. Лихачев [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1989. – 320 с.

39. **Панин, В.Е.** Структурные уровни деформации и разрушения [Текст] / В.Е. Панин [и др.]. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1990. – 255 с.

40. **Финкель, В.М.** Физика разрушения. Рост трещин в твердых телах [Текст] / В.М. Финкель. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.

41. Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера [Текст] / М.А. Криштал, А.А. Жуков, А.Н. Кокора. – М.: Металлургия, 1973. – 192 с.

42. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками [Текст] / В.В. Углов [и др.]. – Минск: БГУ, 2013. – 241 с.

43. Плазменные упрочняющие технологии [Текст] / Ю.Н. Тюрин, М.Л. Жадкевич. – Киев: Наукова думка, 2008. – 216 с.
44. Технологическая платформа «Материалы и технологии металлургии» [Электронный ресурс]: Национальный исследовательский университет: официальный сайт. – Режим доступа: [http://www.hse.ru/org/hse/tp/matter\\_mtlrg](http://www.hse.ru/org/hse/tp/matter_mtlrg).
45. ICAMS [Электронный ресурс]: The Interdisciplinary Centre for Advanced Materials Simulation: официальный сайт. – Режим доступа: <http://www.icams.de/content/icams/icams.html>.
46. Моделирование  $\gamma$ - $\alpha$  превращения в сталях [Текст] / А.А. Васильев, Д.Ф. Соколов, С.Ф. Соколов, Н.Г. Колбасников // ФТТ. – 2012. –Т.54. –№8. – С. 1565–1575.
47. Формирование структурно-фазовых состояний металлических сплавов при магнитно-импульсной обработке [Текст] / В.Л. Володин, О.Л. Хасанов, Т.В. Володин, В.Е. Громов, С.В. Коновалов. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2011. – 221с.
48. Наноматериалы: структура, свойства и применение [Текст] / А.М. Глезер, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Ю.П. Шаркеев. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2012. – 423 с.
49. **Юрьев, А.Б.** Упрочнение строительной арматуры и прокатных валков [Текст] / А.Б. Юрьев. – Новосибирск: Наука, 2006. – 227 с.
50. Прокатка и термическая обработка рельсов [Текст] / П.Н. Полухин, Ю.В. Грдина, Е.Я. Зарвин. – М.: Металлургиздат, 1962. – 510 с.
51. **Сарычев, В.Д.** Математическое моделирование процессов образования и поведения градиентных структур в металлах при внешних энергетических воздействиях [Текст] / автореф. дис. ... канд. техн. наук / Сарычев Владимир Дмитриевич. – Новокузнецк, 2002. – 140 с.
52. Анализ теплофизической ситуации при дифференцированной закалке [Текст] / В.Д. Сарычев, В.А. Рыбьянец, В.В. Грачев, В.И. Петров, В.Е. Громов // Изв. вузов. Чёрная Металлургия. – 2001. –№ 4. – С. 46–48.
53. Прерывистое охлаждение арматуры большого диаметра в потоке стана 450 [Текст] / А.Б. Юрьев, В.Д. Сарычев, В.Я. Чинокалов, В.Е. Громов // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2002. – № 2. – С. 44–46.
54. Моделирование на ЭВМ процессов превращений аустенита в сталях при прерывистом охлаждении арматуры большого диаметра [Текст] / В.Д. Сарычев, А.Б. Юрьев, В.Е. Громов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2003. – № 6. – С. 3031.
55. Математическая модель тепловых процессов в титане с учетом фазовых переходов [Текст] / В.Д. Сарычев, Е.С. Ващук, В.Е. Громов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – Т.8. – №2. – 2011. – С. 61–65.
56. Математическая модель формирования зоны теплового влияния при воздействии импульсных потоков энергии [Текст] / В.Д. Сарычев, С.В. Коновалов, Б.Б. Хаимзон // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – №8. – 52–56 с.

57. Математическая модель распределения температуры при воздействии плазменных потоков в технологии упрочнения прокатных валков [Текст] / В.Д. Сарычев, О.Ю. Ефимов, Танг Гоуи // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 10. – С. 42–46.
58. Моделирование распределения температуры при воздействии импульсных потоков энергии с учетом испарения [Текст] / Б. Б. Хаимзон, В.Д. Сарычев, Н.А. Соскова, В.Е. Громов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – С. 59 –62.
59. Распространение упругих волн при нарушении сплошности [Текст] / В.И. Петров, В.Д. Сарычев, М.В. Кавлакан // Известия вузов. Черная металлургия. – 1990. – № 10. – С. 34–37.
60. Изменение плотности энергии при нарушении сплошности материала [Текст] / В.И. Петров, В.Д. Сарычев, М.В. Кавлакан // Известия вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 4. – С. 76–78.
61. Математическая модель генерации термоупругих волн при воздействии концентрированных потоков энергии на материалы [Текст] / В.Д. Сарычев, М.С. Волошина, В.Е. Громов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2011. – Т. 8. – № 4. – С. 71–76.
62. Математическая модель растворения частиц углерода в титане при воздействии концентрированных потоков энергии [Текст] / В.Д. Сарычев, Б.Б. Хаимзон, В.Е. Громов, Н.А. Соскова // Титан. – 2012. – № 1. – С. 4–8.
63. Диффузионная модель растворения частиц углерода в титане при воздействии концентрированных потоков энергии [Текст] / Б.Б. Хаимзон, Н.А. Соскова, В.Д. Сарычев, В.Е. Громов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – Т. 9. – № 3. – С. 274–278.
64. Сверхзвуковое течение газозвеси около клина при наличии отраженных частиц [Текст] / В.Д. Сарычев, А.П. Трунев, В.М. Фомин // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1985. – № 5. – С. 102–110.
65. Фильтрационная модель пластической деформации [Текст] / В.Д. Сарычев, В.А. Петрунин // Известия вузов. Черная металлургия. – 1993. – № 2. – С. 29–33.
66. Фильтрационная модель пластической деформации материалов [Текст] / В.Д.Сарычев, С.А.Невский, Е.Айфантис, Е.В.Черемушкина, В.Е.Громов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2014.– Т. 11. – № 1. – С. 127 –130.
67. Влияние импульсных магнитных полей на структуру и свойства металлических сплавов. [Текст] / В.Л. Володин, В.Д. Сарычев, Л.Н. Гудимова // Известия вузов. Черная металлургия. – 1990. – № 10. – С. 77–79.
68. Теоретическая модель воздействия нагрузки на упрочнённый рельс [Текст] / В.Д. Сарычев, В.А. Бердышев, В.И. Петров // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 1998. – № 4. – С.17–20.
69. Образование наноразмерных структур в металлах при воздействии импульсных плазменных струй электрического взрыва [Текст] / В.Д. Сарычев,

Е.С. Ващук, Е.А. Будовских, В.Е. Громов // Письма в Журнал технической физики. – 2010. – № 14. – С. 41–48.

70. Математическое моделирование и исследование формирования конвективных структур в металлах при воздействии импульсных многофазных плазменных струй [Текст] / В.Д. Сарычев, С.П. Мочалов, Е.А. Будовских, Е.С. Ващук, В.Е. Громов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 6. – С. 43–56.

71. Гидродинамическая модель образования наноструктурных слоев [Текст] / В.Д. Сарычев, А.Ю. Грановский, С.Н. Старовацкая, В.Е. Громов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 6. – С. 62–65.

72. Модель формирования внутренних нанослоев при сдвиговых течениях материалов [Текст] / А.Ю. Грановский, В.Д. Сарычев, В.Е. Громов // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – Вып. 10. – С. 155–158.

73. Модель перемешивания слоев, созданных при электровзрывной обработке [Текст] / В.Д. Сарычев, А.Ю. Грановский, Е.В. Черемушкина, В.Е. Громов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2013. – Т. 10. – № 4. – С. 558–562.

74. Сибирский государственный индустриальный университет 1930–2010 [Текст] / ред. кол. С.П. Мочалов [и др.]. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2010. – 399 с.

75. Прочность и пластичность материалов при внешних энергетических воздействиях [Текст] / под ред. В.Е. Громова.

Научно-справочное издание

**Громов Виктор Евгеньевич**

**Научные школы СибГИУ**

**ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ  
В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Редактор Я.А. Селякова  
Компьютерная верстка С.А. Невский, Т.Г. Бокова

Подписано в печать 04.12.2014 г.  
Формат бумаги 60 × 84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.  
Усл.печ.л. 7,86. Уч.-изд.л. 8,38. Тираж 100 экз. Заказ 736

Сибирский государственный индустриальный университет  
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.  
Издательский центр СибГИУ