


На правах рукописи



Невский Сергей Андреевич

**ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ФОРМИРОВАНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ
СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ И СВОЙСТВ
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ
КОМБИНИРОВАННЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ
ПРИ ВНЕШНИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новокузнецк – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный консультант

Громов Виктор Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Столяров Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, г. Москва

Гынгазов Сергей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор отделения контроля и диагностики, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Носков Федор Михайлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры материаловедения и технологии обработки материалов, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Ведущая организация

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина», г. Тамбов

Защита состоится «17» мая 2022 года в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.252.04 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, г. Новокузнецк, Кемеровская область - Кузбасс, ул. Кирова, зд. 42. Тел: (3843) 77-79-79; Факс: (3843) 46-57-92.

E-mail: d212_252_04@sibsiu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», <http://www.sibsiu.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.х.н., профессор



Горюшкин
Владимир Фёдорович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из фундаментальных проблем физики конденсированного состояния является теоретическое исследование влияния электрических, тепловых и механических полей на структуру, фазовый состав и свойства металлических материалов, а также прогнозирование их поведения в процессе длительной эксплуатации, так как от этого зависит эффективность того или иного режима обработки. В настоящее время интерес ученых направлен на модификацию структуры и свойств поверхностных слоев материалов внешними энергетическими воздействиями. Это обусловлено тем, что в поверхностных слоях условия зарождения дефектов кристаллической решетки, приводящих к износу и коррозии изделий ответственного назначения, более благоприятные, чем в объеме материала. Для того чтобы избежать преждевременного выхода из строя данных изделий необходим поиск новых и усовершенствование существующих методов защиты их поверхности. К их числу относятся концентрированные потоки энергии (электронно-пучковая обработка, электровзрывное легирование и напыление, лазерная обработка и т.п.), импульсные электрические поля, интенсивная пластическая деформация, которые способствуют формированию на поверхности и в объеме обрабатываемого изделия микро- и наноструктурных состояний, обеспечивающих его высокую прочность и износостойкость за относительно короткое время. Однако широкому внедрению данных методов защиты в практику препятствует отсутствие детальных сведений о закономерностях и механизмах формирования микро- и наноструктур при данных воздействиях. Решение этой проблемы позволит получать материалы с заданной структурой и высоким уровнем свойств. Особую роль в формировании микро- и наноструктур играют внешние и внутренние межфазные границы. На них возникают и развиваются, в зависимости от внешних условий, различного рода неустойчивости, которые приводят к самопроизвольному переходу обрабатываемого материала в состояние с микро и наноструктурой. В этой связи особую актуальность приобретает поиск закономерностей и механизмов формирования этих структур при энергетических воздействиях на основе представлений о развитии комбинированных гидродинамических неустойчивостей.

Степень разработанности темы. Экспериментальные и теоретические исследования влияния электрических, тепловых и механических полей на металлические материалы ведутся более 50 лет на различных структурно-масштабных уровнях. Большой вклад в развитие структурно-фазовых превращений в металлах и сплавах при внешних воздействиях внесли научные коллективы под руководством Р.З. Валиева, А.М. Глезера, Б.Б. Страумала, Э.В. Козлова, Л.Б. Зуева, В.Е. Громова, С.Г. Псахье, В.В. Столярова. Среди работ зарубежных исследователей следует выделить работы В. Лойковского, Ю.В. Иванисенко, В.Г. Гаврилюка, Г. Танга, Р. Квина, Я. Бейгельзимера, Xavier Sauvage.

В настоящее время установлено, что воздействие на материал плазмы электрического взрыва проводников, электронного пучка микросекундной длительности приводит к формированию в поверхностном слое градиента структуры и физико-механических свойств. Его возникновение не может быть объяснено только неоднородным распределением тепловых полей и различными скоростями охлаждения. Для устранения этого недостатка тепловых моделей применяются гидродинамические модели, основанные на возникновении неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца, Рэлея-Тейлора и Марангони. Численное решение дисперсионного уравнения для неустойчивости Кельвина-Гельмгольца на границе «плазма/расплав» показало, что существует диапазон характеристик материала и параметров внешнего воздействия, при которых реализуется два максимума скорости роста возмущений границы раздела сред. Первый максимум находится в нанометровом диапазоне длин волн, а второй – в микрометровом. Установлено, что поверхностные периодические структуры, возникающие при воздействии плазмы электрического взрыва проводников и электронно-пучковой обработке, обусловлены термокапиллярной неустойчивостью, образующейся при наличии градиента температур.

При воздействии импульсных электрических токов на деформируемый материал происходит формирование микро и наноструктурно-фазовых состояний. В настоящее время данный эффект обнаружен в различных сплавах сложного химического состава. Однозначной интерпретации этого явления не существует.

Изучению структурных превращений в материалах при интенсивной пластической деформации в настоящее время посвящено множество работ. Из всего их многообразия следует выделить работы по структурно-фазовым превращениям в рельсовой стали при длительной эксплуатации. Установлено, что длительная эксплуатация объемных и дифференцированно закаленных рельсов из высокоуглеродистой перлитной стали приводит к формированию частиц цементита микро- и наноразмерного диапазона путем разрезания его пластин скользящими дислокациями и в результате вытягивания атомов углерода из кристаллической решетки.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ Сибирского государственного индустриального университета в рамках: грантов Российского научного фонда (проекты №15-19-00065, №15-12-00010 и № 20-19-00452), Российского фонда фундаментальных исследований (№ 15-08-03411_a и 16-48-420530 p_a) и государственного задания Минобрнауки № 3.1283.2017/4.6, гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых – кандидатов наук (МК-118.2019.2).

Цель работы: установление механизмов и создание физико-математических моделей формирования градиентных микро- и наноструктурных состояний металлических материалов при воздействии электрических, механических полей и концентрированных потоков энергии на основе комбинированных сдвиговых неустойчивостей на границах раздела сред.

Задачи работы:

1. Выявление закономерностей и механизмов влияния импульсного электрического тока на локализацию пластического течения металлических материалов методами двухэкспозиционной спекл-интерферометрии и создание модели локализации пластической деформации в условиях воздействия электрических полей на основе представлений о материале как о двухфазной гетерогенной среде.

2. Создание физико-математической модели формирования волнообразного рельефа границы раздела «покрытие / подложка» при нанесении покрытий электровзрывным методом, на основе представлений о возникновении и развитии комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора. Установление режимов нанесения покрытий, обеспечивающих их высокую адгезию.

3. Установление механизмов и создание модели формирования микро- и наноструктур в титановых и алюминиевых сплавах при воздействии низкоэнергетических сильноточных электронных пучков на основе представлений о возникновении на границе раздела «плазма/расплав» комбинированной термо-, испарительно-капиллярной и термоэлектрической неустойчивости. Поиск режимов электронно-пучковой обработки, обеспечивающих наноструктурные состояния поверхностных слоев металлических материалов.

4. Выявление механизмов и разработка моделей формирования микро и наноструктур при длительной эксплуатации рельсовой стали перлитного класса с использованием представлений о распаде пластин цементита за счет комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора.

5. Предложить научно-обоснованные подходы по обработке металлических материалов внешними энергетическими воздействиями (плазменная обработка, электронно-пучковая обработка, интенсивная пластическая деформация) на основе применения комбинированных сдвиговых неустойчивостей.

Научная новизна

Установлено, что воздействие импульсного электрического тока на локализацию пластического течения стали 08пс приводит к увеличению на 65% скорости очагов локализации. Предложен механизм данного увеличения, заключающийся в том, что из-за различия электрических сопротивлений тела и границы зерна, температура границы зерна выше, чем в основном объеме. Это облегчает сдвиг зерен относительно друг друга при воздействии электрического тока и увеличивает скорость очагов локализации. На основе этого механизма с использованием фильтрационной модели пластической деформации рассчитана скорость распространения очагов локализации при воздействии импульсного электрического тока. Результаты моделирования показали полное соответствие с экспериментом. Показано, что причиной такого увеличения является изменение объемной доли возбужденной фазы на границах очага локализации.

Впервые предложен механизм и разработана модель формирования волнообразного рельефа границы раздела «покрытие /подложки» при нанесении

покрытия гетерогенным плазменным потоком, заключающаяся в образовании комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора.

Установлен механизм и впервые создана модель формирования поверхностных микро- и наноструктур титановых и алюминиевых сплавов при электронно-пучковой обработке на основе представлений о возникновении в расплавленном слое комбинированной термо-, концентрационно-, испарительно-капиллярной и термоэлектрической неустойчивости, которая приводит к образованию вихрей, являющихся предвестниками образования микро и наноструктурно-фазовых состояний. Определен диапазон значений плотности энергии пучка электронов и термоэлектрического коэффициента γ , при которых максимум скорости роста находится в наноразмерном диапазоне.

Предложена математическая модель формирования микро и наноструктурно-фазовых состояний рельсовой стали при длительной эксплуатации. При создании математической модели предполагалось, что образование наноструктур происходит за счет распада пластин цементита путем комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора. Путем анализа дисперсионного уравнения определены скорости и ускорения слоев, динамических вязкостей материалов, при которых максимальное значение скорости роста возмущений наблюдается в микро и наноразмерном диапазоне. Сравнение значений длины волны, на которую приходится максимум скорости роста и размеров структурных элементов, показало удовлетворительное согласие с экспериментом.

Научная и практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы способствуют углубленному развитию физики взаимодействия электрических, тепловых и механических полей с конденсированным веществом. Предложенные в работе физико-математические модели могут быть применены для прогнозирования поведения материалов в различных технологических процессах и при эксплуатации.

По данным математического моделирования формирования волнообразного рельефа поверхности раздела «покрытие/подложка» получены зависимости длины волны, при которой скорость роста возмущений поверхности раздела достигает максимального значения, от величины зарядного напряжения и времени импульса. Данные зависимости имеют степенной вид с коэффициентом корреляции 0,99. Они используются для оптимизации режимов электровзрывного напыления покрытий, обеспечивающих высокую адгезию с подложкой.

Установлены зависимости длины волны λ_m , при которой достигается максимум скорость роста возмущений поверхности раздела, от величины плотности энергии электронного пучка. С ростом плотности энергии пучка электронов величина λ_m снижается, переходя из микродиапозона в нанодиапозон. Полученная зависимость используется для нахождения режимов электронно-пучковой обработки, обеспечивающих получение поверхностных наноструктур.

Изучена неустойчивость границы раздела слоев «расплав/плазма» цилиндрической геометрии. Эта неустойчивость обусловлена комбинацией и магнитогидродинамической неустойчивости и неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Определены условия возникновения капельного массопереноса в электрической дуге, что может быть использовано для корректировки режимов электродуговой наплавки.

Механизм и модель формирования микро и наноструктур в рельсовой стали при длительной эксплуатации способствуют развитию теории структурно-фазовых превращений в сталях и могут послужить основой для корректировки режимов термомеханической обработки длинномерных рельсов.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров, магистрантов и аспирантов по направлениям подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» и 03.06.01 «Физика и астрономия» и в научной работе при подготовке отчетов по грантам Российского научного фонда, Российского фонда фундаментальных исследований и государственных заданий Минобрнауки РФ.

Использование результатов работы в производстве, учебном процессе и научной деятельности подтверждается соответствующими актами и справками.

Методология и методы исследований. Методология диссертационной работы основана на современных представлениях о формировании микро и наноструктур при различных внешних энергетических воздействиях вследствие одновременного протекания различных неустойчивостей течения материалов (неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, Рэлея-Тейлора, термокапиллярная, испарительно-капиллярная и термоэлектрическая неустойчивости и т.п.) на внутренних и внешних границах раздела фаз. Для достижения поставленных в работе задач были использованы следующие методы современного физического материаловедения: просвечивающая электронная микроскопия, рентгеноструктурный и рентгеноспектральный анализ, механические испытания на активную пластическую деформацию. Локализация пластической деформации изучалась с помощью метода двухэкспозиционной спекл-интерферометрии, предложенного в работах Л.Б. Зуева и В.И. Данилова. Для решения задач математического моделирования применялся линейный анализ устойчивости, заключающийся в получении дисперсионного уравнения для малых гармонических возмущений поверхности раздела и нелинейный численный анализ методом конечных элементов.

Для анализа пластического течения материала при воздействии электрического тока материалов использовались представления о материале как о гетерогенной среде. Первая фаза является возбужденной, она отвечает за структурные превращения в материале, а вторая невозбужденная, не связанная со структурными превращениями. Для каждой фазы записываются законы сохранения импульса и уравнение непрерывности. Взаимодействие этих фаз порождает волну пластичности. В качестве первой фазы выбирались границы зерна, а второй – тело зерна.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обусловлена корректностью постановки задач исследования, комплексным подходом к их решению с использованием современных экспериментальных и теоретических методов современной физики конденсированного состояния и физического материаловедения, применением методов математической статистики, сертифицированного программного обеспечения, согласием экспериментальных данных с данными математического моделирования, критическим сопоставлением с результатами других исследователей.

Положения, выносимые на защиту

1. Механизм увеличения предельной скорости очагов локализации пластического течения малоуглеродистой стали при воздействии импульсного электрического тока на основе представлений о материале как о двухфазной гетерогенной среде, заключающийся в изменении объемной доли возбужденной фазы на их границах, за счет неоднородного распределения температуры в зеренной структуре вследствие различного электрического сопротивления тела и границ зерен.
2. Волнообразный рельеф поверхности раздела «покрытие/подложка» при электровзрывном напылении обусловлен возникновением и развитием комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора. Зависимости длины волны, при которой скорость роста возмущений поверхности раздела достигает максимального значения, от величины зарядного напряжения и времени импульса, полученные путем анализа дисперсионного уравнения.
3. Процесс формирования поверхностных микро и наноструктур при воздействии низкоэнергетического сильнофокусированного электронного пучка за счет развития комбинированной термо-, концентрационно-, испарительно-капиллярной и термоэлектрической неустойчивости. Результаты анализа дисперсионного уравнения при различных значениях плотности энергии пучка электронов. Уменьшение длины волны, на которую приходится максимум скорости роста возмущений поверхности раздела, с ростом плотности энергии пучка электронов, вне зависимости от величины термоэлектрического коэффициента. Диапазон значений термоэлектрического коэффициента $\gamma \sim 10^{-1} - 1$ В/К титановых и алюминиевых сплавов, в котором влияние термоэлектрической неустойчивости становится наиболее существенным.
4. Механизм и модель формирования микро и наноструктурных состояний рельсовой стали при интенсивной пластической деформации, реализуемой по схеме длительной эксплуатации, заключающиеся в распаде пластин цементита за счет комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора в приближении вязкопотенциальной и вязкоупругой жидкости.

Личный вклад автора

Автором определялись направления и детальный план всех исследований, представленных в диссертационной работе. Все экспериментальные и теоретические данные были получены лично автором и/или при его непосредственном участии. Результаты электронно-микроскопических исследований получены в сотрудничестве с д.ф.-м.н., профессором Ивановым Ю.Ф., а рент-

геноструктурных исследований в сотрудничестве с д.ф.-м.н., профессором Кульковым С.Н. Исследования локализации пластической деформации при воздействии электрического тока выполнены совместно с аспирантом Гагариным А.Ю. и к.т.н., старшими научными сотрудниками Горбатенко В.В. и Луневым А.Г., при этом автор принимал непосредственное участие в анализе результатов эксперимента. Разработка моделей, представленных в диссертации, велась в сотрудничестве с к.т.н., доцентом Сарычевым В.Д. и д.т.н, профессором Коноваловым С.В. Конечно-элементные расчеты выполнены к.т.н. Грановским А.Ю. при участии автора в анализе и интерпретации их результатов. Соискателем внесен решающий вклад в анализ данных эксперимента и математического моделирования, а также в их представление в научной печати.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы доложены на международных и всероссийских конференциях: III, V – VIII Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», Москва, 2009, 2013, 2015, 2017, 2019; XXII Международной конференции «Релаксационные явления в твердых телах», Воронеж, 2010; Международной научно-технической конференции «Современное материаловедение и нанотехнологии», Комсомольск на Амуре, 2010; 50-м международном симпозиуме «Актуальные проблемы прочности», Витебск, 2010; VII Всероссийской конференции «Физико-химия неорганических материалов», Москва, 2010; Международные конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», Томск, 2015 – 2021; VI – XI Международных конференциях «Фазовые превращения и прочность кристаллов», Черногловка, 2010 – 2020. IV – IX Международных школах «Физическое материаловедение», Тольятти 2009 – 2019. XX и XXIII Петербургских чтениях по проблемам прочности, Санкт-Петербург, 2012, 2016; LI, LV, LIV, LVII – LX Международных конференциях «Актуальные проблемы прочности», Харьков, 2011, 2014, Севастополь 2016, Пермь 2017, Тольятти, 2017, 2021. Витебск, 2018; XIV, XV Международных школах-семинарах (ЭДС-2016, 2018), Барнаул, 2016, 2018; XIII и XIV Международных семинарах «Структурные основы модифицирования материалов», Обнинск, 2015, 2017. III Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Ю.Н. Работнова, Новосибирск 2014, Научной сессии НИЯУ МИФИ-2015, Москва 2015; XIII ежегодном заседании Научного Совета по физике конденсированных сред при отделении физических наук РАН, Черногловка, 2020; Международной конференции «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий», Новокузнецк, 2021.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, основному содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует специальности 01.04.07. – физика конденсированного состояния пп. 1 и 7 (п. 1 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материа-

лов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления», п. 7 «Технические и технологические приложения физики конденсированного состояния»).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 70 печатных работах, в том числе: в 15 статьях, включенных в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, 20 статьях в журналах, входящих в Перечень, рекомендованный ВАК для публикации результатов диссертационных исследований, 3-х монографиях, остальные - в трудах всероссийских и международных конференций и других научных мероприятий. Получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация включает в себя введение, 6 глав, основные выводы, список литературы из 346 наименований, приложение, изложена на 247 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков, 21 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проведенных исследований, степень разработанности темы диссертации, сформулированы цели и задачи настоящей работы, изложены научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, приведена структура и содержание диссертационной работы.

В **первой главе «Закономерности и механизмы воздействия электрических полей и концентрированных потоков энергии на металлы и сплавы»** приведен обзор литературы по проблемам формирования структурно-фазовых состояний и свойств металлов и сплавов при воздействии постоянных и переменных электрических полей, концентрированных потоков энергии (гетерогенные плазменные потоки, низкоэнергетические сильноточные электронные пучки), длительной эксплуатации. Показано, что перспективными представлениями о форсировании микро- и наноструктур при воздействии концентрированных потоков энергии и длительной эксплуатации являются гидродинамические неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, Марангони, Рэлея-Тейлора. Для изучения пластической деформации материалов в условиях электрических полей и токов целесообразней рассматривать материал как двухфазную гетерогенную среду, состоящую из возбужденной фазы, которая отвечает за структурную перестройку системы и невозбужденной – не связанной со структурными превращениями.

На основании анализа литературных источников сформулированы направления исследований и обоснован выбор модельных материалов, представленных в диссертации.

Вторая глава «Комбинированные сдвиговые неустойчивости в одно- и двухфазных средах» посвящена исследованию начальных стадий комбинированных неустойчивостей в металлических материалах при воздействии плазмы электрического взрыва проводников, электронно-пучковой обработки и активной пластической деформации. В **параграфе 2.1** изложен подход к решению

задач диссертационного исследования, основанный на представлении о материале как о двухфазной гетерогенной среде. Первая фаза является возбужденной, она отвечает за структурные превращения, вторая фаза – невозбужденная, не связанная со структурными превращениями. Для каждой из фаз записывались законы сохранения импульса, массы и уравнение состояния. Предполагалось, что фазы, составляющие материал, взаимодействуют по схеме Рахматулина – Нигматуллина. При отсутствии второй фазы уравнения сохранения импульса и массы с учетом уравнений состояния переходят в уравнения Навье-Стокса. Представленный подход был использован в **параграфе 2.2** для исследования локализации пластического течения материалов при деформировании с постоянной скоростью. Так как пластическая деформация поликристаллических материалов осуществляется путем трансляционного скольжения и зернограничного проскальзывания, то в качестве первой фазы принимались границы зерен, а в качестве второй фазы – тело зерна. При этом первая фаза являлась сжимаемой и описывалась уравнением состояния $p = A_1 \rho_1$, а вторая фаза считалась несжимаемой $\rho_s = \text{const}$. Основные уравнения модели получаются путем пренебрежения инерционным членом в уравнении баланса импульсов первой фазы. В одномерном случае они имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \alpha_1}{\partial x} &= (1 - \alpha_1) \frac{\partial u_2}{\partial x}, \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} &= - \frac{1}{(1 - \alpha_1) \rho_s} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_1 u_1)}{\partial x} = 0, \\ u_1 &= u_2 - \frac{\alpha}{\varphi} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \varphi = K(1 - \alpha_1) \rho_e, \end{aligned} \quad (1)$$

где α_1 и α_2 – объемные доли первой и второй фаз ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$), ρ_e , ρ_s , u_1 , u_2 – их истинные плотности, p – давление, $\rho_1 = \alpha_1 \rho_e$, $\rho_2 = \alpha_2 \rho_s$, K – постоянная. Линеаризация этой системы относительно малых гармонических возмущений привела к следующему дисперсионному уравнению:

$$\Omega \left(\Omega^2 - \frac{i A_1 \alpha_0^2 k^2 \Omega}{(\alpha_0 - 1) K} + \frac{A_1 k^2 \rho_0}{(\alpha_0 - 1) \rho_s} \right) = 0, \quad (2)$$

где Ω – циклическая частота. Его решения имеют вид:

$$\Omega_1 = 0; \quad \Omega_{2,3} = \frac{i A_1 \alpha_0^2 k^2}{2(\alpha_0 - 1) K} \pm \frac{A_1 \alpha_0^2 k^2}{2(\alpha_0 - 1) K} \sqrt{-1 - \frac{4 K^2 \rho_0 (\alpha_0 - 1)}{\rho_s \alpha_0^4 k^2 A_1}}. \quad (3)$$

Неустойчивость стационарного состояния относительно малых возмущений наступает при следующем условии:

$$k > \frac{2K}{A_1 \rho_s \alpha_0^2} \sqrt{A_1 \rho_s \rho_0 (1 - \alpha_0)} \quad \text{или} \quad \lambda < \frac{\pi A_1 \rho_s \alpha_0^2}{K \sqrt{A_1 \rho_s \rho_0 (1 - \alpha_0)}}. \quad (4)$$

Оценка λ_* при $\rho_s \approx \rho_0 = 7800 \text{ кг/м}^3$, $\alpha_0 = 0,1$ и $\eta_1 = 10^5 \text{ Па}\cdot\text{с}$ показала, что $\lambda_* = 1,31 \text{ мм}$, что соответствует экспериментальным данным спекл-интерферометрических исследований. Это означает, что представленная мо-

дель дает адекватное описание образованию очагов локализации пластической деформации.

В параграфе 2.3 изучается начальная стадия комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора «жидкость/жидкость» методами линейного анализа. Рассматривалась устойчивость плоского стационарного течения двухслойной несжимаемой жидкости. Направление оси x выбиралось вдоль границы раздела между слоями, а ось y - перпендикулярно x и направлена в сторону второго слоя. Первый слой ($-\infty < x < \infty$, $-h < y < a(x,t)$, где a – смещение поверхности раздела, h – толщина нижнего слоя) занимала вязкая неподвижная жидкость с вязкостью η_1 , и плотностью ρ_1 . Второй слой ($-\infty < x < \infty$, $a(x,t) < y < H$, где H – толщина верхнего слоя) занимала жидкость с вязкостью η_2 и плотностью ρ_2 , которая движется с постоянной скоростью u_0 , направленной вдоль оси x . Ускорение g направлялось в сторону противоположную оси y . Для каждого слоя записывались линеаризованные уравнения Навье-Стокса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_n}{\partial t} + u_{0n} \frac{\partial u_n}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho_n} \frac{\partial p_n}{\partial x} + \nu_n \left(\frac{\partial^2 u_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_n}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial v_n}{\partial t} + u_{0n} \frac{\partial v_n}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho_n} \frac{\partial p_n}{\partial y} + \nu_n \left(\frac{\partial^2 v_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_n}{\partial y^2} \right), \quad \frac{\partial u_n}{\partial x} + \frac{\partial v_n}{\partial y} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где u_n , v_n , p_n – возмущения скорости и давления соответственно.

На границе раздела задавались кинематические и динамические условия:

$$\begin{aligned} y = H : u_2 &= v_2 = 0, \quad y = -h : u_1 = v_1 = 0, \\ y = 0 : \frac{\partial a}{\partial t} + u_{02} \frac{\partial a}{\partial x} &= v_2, \quad \frac{\partial a}{\partial t} + u_{01} \frac{\partial a}{\partial x} = v_1, \\ -p_1 + 2\eta_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} + p_2 - 2\eta_2 \frac{\partial v_2}{\partial y} &= \sigma_0 \frac{\partial^2 a}{\partial x^2}, \\ \eta_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) &= \eta_2 \left(\frac{\partial u_2}{\partial y} + \frac{\partial v_2}{\partial x} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где $a(x,t)$ – возмущение поверхности раздела. Для решения задачи (5) и (6) применялось вязко-потенциальное приближение, согласно которому эффекты, связанные с вязкостью имеют место вблизи границы раздела сред. Поиск решения (5) и (6) в виде бегущей гармонической волны приводит к следующему дисперсионному уравнению:

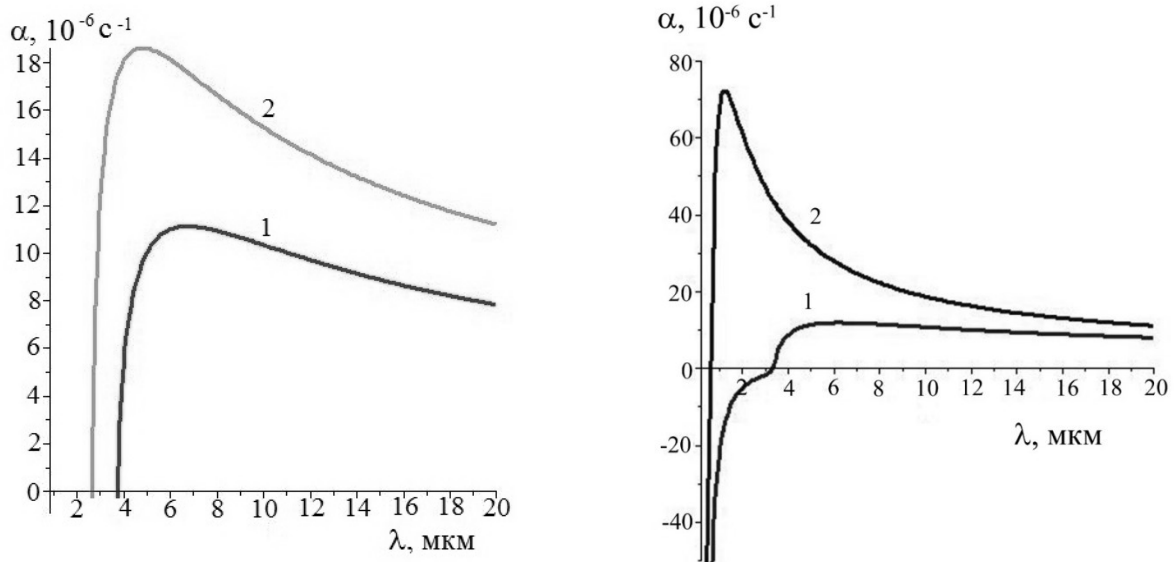
$$\begin{aligned} \omega^2 + 2\omega(a - ib) + c - ic_1 &= 0, \\ a &= \frac{1}{(1+\mu)R_1} \left((\eta_1 \coth(kh) + \eta_2 \coth(kH))k^2 \right), \quad b = \frac{\mu k u_0}{1+\mu}, \\ c &= \frac{\omega_0^2 - k^2 u_0^2 \mu}{1+\mu}, \quad c_1 = \frac{2u_0 k^3 \eta_2 \coth(kH)}{(1+\mu)R_1}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\omega = \alpha + i\Omega$ – комплексная циклическая частота,
 $\omega_0^2 = \frac{\sigma_0 k^3 + (\rho_1 - \rho_2) g k}{R_1}$, $\mu = \frac{R_2}{R_1}$, k – волновое число, $R_1 = \rho_1 \coth(kh)$,

$R_2 = \rho_2 \coth(kH)$, σ_0 – межфазное поверхностное натяжение, g – ускорение одного из слоев. Зависимость скорости роста возмущений поверхности раздела от длины волны имеет вид:

$$\alpha = \left(\sqrt{\frac{(\delta + \sqrt{\delta^2 + 4\delta_1^2})ab}{2}} - a \right), \quad (8)$$

где $\delta = (a^2 - b^2 - c)/(ab)$, $\delta_1 = 1 - (c_1/2ab)$. На рисунке 1 а приведены зависимости скорости роста возмущений от длины волны возмущений границы раздела «покрытие/подложка» при различных значениях ускорения второго слоя на примере системы Ti-Y. При проведении расчетов предполагалось, что амплитуда возмущений много меньше толщины слоев. В этом случае $\coth(kH) = \coth(kh) = 1$. Из данного рисунка следует, что максимум скорости роста при ускорении второго слоя $g = 5 \cdot 10^9$ м/с² приходится на длину волны $\lambda_m = 6,76$ мкм (рисунок 1а, кривая 1). В свою очередь увеличение значения ускорения до 10^{10} м/с², приводит к уменьшению значения λ_m до 4,81 мкм (рисунок 1 а, кривая 2). Учет влияния поперечной скорости второго слоя приводит к уменьшению значений λ_m до 6,23 мкм при $u_0 = 10$ м/с и 1,24 мкм при $u_0 = 50$ м/с соответственно.



а) $a - u_0 = 0$ м/с ($1 - g = 5 \cdot 10^9$ м/с²; $2 - g = 10^{10}$ м/с²)
 б) $b - g = 5 \cdot 10^9$ м/с² ($1 - u_0 = 10$ м/с; $2 - u_0 = 50$ м/с)

Рисунок 1 – Зависимости скорости роста возмущений поверхности раздела от длины волны при различных значениях скорости и ускорения второго слоя

При наличии между покрытием и подложкой тонкого переходного слоя необходимо задать динамические условия, которые учитывают взаимное проникновение вещества («перколяционные» граничные условия):

$$\begin{aligned} y = 0: \quad & \rho_1 \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} + u_{01} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \right) + 2 \left(\eta_1 \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial x^2} - \eta_2 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial x^2} \right) = \\ & = \rho_2 \left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial t} + u_{02} \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \right) + \sigma_0 \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

Они приводят к дисперсионному уравнению типа (7), но с другими значениями коэффициентов a , c , c_1 , которые имеют вид:

$$\begin{aligned} a = \frac{1}{(1 + \mu)R_1} \left((\eta_1 \coth(kH) + \eta_2 \coth(kh))k^2 \right), \quad c = \frac{\omega_0^2 - k^2 u_0^2 \mu}{1 + \mu}, \\ c_1 = \frac{2u_0 k^3 \eta_1 \coth(kH)}{(1 + \mu)R_1}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для нахождения зависимости $\alpha = \alpha(\lambda)$, как при «непроницаемых», так и при «перколяционных» граничных условиях, будем считать, что амплитуда возмущений много меньше толщины покрытия и подложки. Расчеты показали, что при одинаковых значениях динамической вязкости слоев показали, что динамические условия (6) и (10) приводят к одним и тем же результатам. Действительно, если $\eta_1 = \eta_2 = 3,71 \cdot 10^{-3}$ Па·с и $u_0 = 10$ м/с, то при «непроницаемых» и «перколяционных» граничных условиях $\lambda_m = 5,68$ мкм.

В параграфе 2.4 изучена комбинированная термокапиллярная испарительно-капиллярная и термоэлектрическая неустойчивость расплавленных слоев при воздействии концентрированных потоков энергии на примере низкоэнергетических сильноточных электронных пучков. Анализировалась начальная стадия данной неустойчивости, в которой возникают малые возмущения на поверхности расплава. Длина волны этих возмущений, при которой их рост максимальным, будет определять размер образовавшихся поверхностных структур при кристаллизации материала. Рассматривалась вязкая теплопроводная испаряющаяся жидкость, которая занимает слой толщиной h ($-h < y < 0$ и $-\infty < x < +\infty$) на свободной поверхности $y = a(x, t)$. Для этой жидкости записывалась линеаризованная система уравнений Навье-Стокса (5) и конвективной теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + wG_0 = \chi \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (11)$$

где T – возмущение температуры, χ – температуропроводность, G_0 – градиент невозмущенной температуры. При записи динамических граничных условий учитывались: температурная зависимость поверхностного натяжения расплава ($\sigma = \sigma_0 + \sigma_T(T - T_L)$), σ_0 – поверхностное натяжение при температуре плавления, σ_T – температурный коэффициент поверхностного натяжения, T_L –

температура плавления термоэлектрического поля) и поправки, связанные с воздействием электрического поля и давления отдачи паров:

$$y=0: \rho v \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \sigma_T \frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon \varepsilon_0 E_0^2 \frac{\partial a}{\partial x},$$

$$-(p + \varepsilon \varepsilon_0 k E_0^2 a) + 2\rho v \frac{\partial v}{\partial y} + p'_v T = \sigma_0 \frac{\partial^2 a}{\partial x^2},$$
(12)

где a – возмущение поверхности расплава вдоль оси z , $E_0 = \gamma G_0$ – напряженность невозмущенного термоэлектрического поля, γ – термоэлектрический коэффициент, p'_v – температурный коэффициент испарительного давления. Кинематические граничные условия и условия для уравнения теплопроводности имеют вид:

$$y=0: v = \frac{\partial a}{\partial t}, \frac{\partial T}{\partial z} = 0,$$

$$y=-h: u=0, v=0, T=0.$$
(13)

Поиск решения системы (5), (11–13) в виде бегущей гармонической волны привел к следующему дисперсионному уравнению:

$$R_T - R_E - R_V - R_\sigma = 0,$$

$$R_\sigma = \omega^2 ((\omega + 2\omega_v)^2 + \omega_c^2) - \frac{4\omega^2 \omega_v^2 k_1}{k},$$

$$R_T = \omega_T \omega_v \left(\delta \left(1 - \frac{k_1}{k_2} \right) (2\omega \omega_v + \omega^2 + \omega_c^2) + \left(1 - \frac{k}{k_2} \right) \left(\frac{2k_1 \omega \omega_v}{k} + \omega_c^2 \right) \right),$$

$$R_E = -\omega_E \omega_v \omega \left(\left(1 - \frac{k_1}{k} \right) \omega_v + \omega \right),$$
(14)

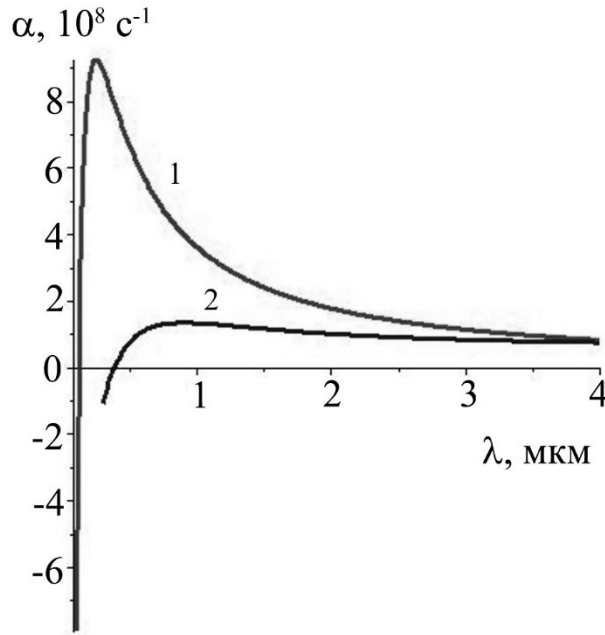
$$R_V = \omega_p \omega_v \left(\left(\delta \left(1 - \frac{k_1}{k_2} \right) + \left(1 - \frac{k}{k_2} \right) \right) \omega_E \omega_v + 2\delta \omega \omega_v \left(1 - \frac{k_1}{k_2} \right) + \right. \\ \left. + (2\omega_v + \omega) \omega \left(1 - \frac{k}{k_2} \right) \right),$$

где $\omega = \alpha + i\Omega$, α – скорость роста возмущений поверхности расплава, Ω – циклическая частота, $\omega_T = \frac{\sigma_T G_0}{\rho v}$, $\omega_v = vk^2$, $\omega_c^2 = \frac{\sigma_0 k^3}{\rho} - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E_0^2}{\rho} k^2$,

$\omega_p = \frac{p'_v G_0}{\rho v k}$, $\omega_E = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E_0^2}{\rho v}$, $\delta = \frac{\text{Pr}}{1 - \text{Pr}}$, $\text{Pr} = \frac{v}{\chi}$ – число Прандтля. Для жидких металлов $\text{Pr} \ll 1$. С учетом этого факта (14) примет вид:

$$\begin{aligned}
& \frac{\omega_T \text{Pr}}{2} (2\omega\omega_v + \omega_c^2) \left(\omega + 2\omega_v \left(1 - \frac{k_1}{k} \right) \right) + \\
& + \frac{\omega_P \text{Pr}}{2} \left(\omega_E \omega_v \left(\omega + 2\omega_v \left(1 - \frac{k_1}{k} \right) \right) + \omega \left(\omega^2 + 2\omega\omega_v + 4\omega_v^2 \left(1 - \frac{k_1}{k} \right) \right) \right) - \\
& - \omega_E \omega_v \omega \left(\left(1 - \frac{k_1}{k} \right) \omega_v + \omega \right) - \omega^2 \left((\omega + 2\omega_v)^2 + \omega_c^2 \right) + \frac{4\omega^2 \omega_v^2 k_1}{k} = 0.
\end{aligned} \tag{15}$$

На рисунке 2 представлены зависимости скорости роста возмущений поверхности расплава от длины волны на примере эвтектического силумина. Из данного рисунка следует, что с учетом термоэлектрических эффектов (рисунок 2 кривая 1) при значениях $\gamma \sim 0,1$ В/К максимальное значение скорости роста возмущений будет наблюдаться в субмикродиапазоне $\lambda_{\max} = 0,25$ мкм). При испарительном давлении $2 \cdot 10^8$ Па (рисунок 2 кривая 2) наблюдается смещение значений длины волны, при которой достигается максимум скорости роста возмущений поверхности раздела, в сторону микродиапазона ($\lambda_{\max} = 0,9$ мкм).

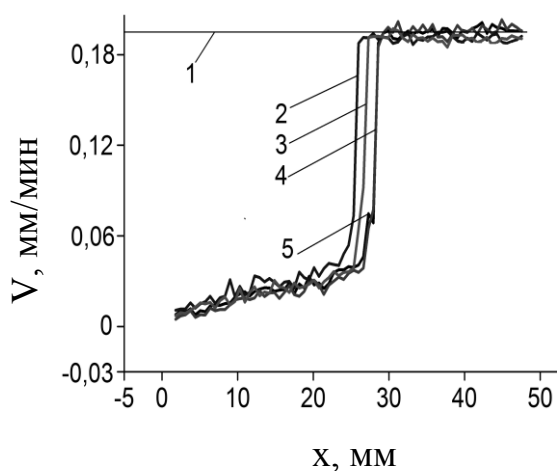


1 – без учета испарения; 2 – при давлении $2 \cdot 10^8$ Па

Рисунок 2 – Зависимости скорости роста возмущений поверхности раздела расплава силумина от длины волны при учете термоэлектрических эффектов

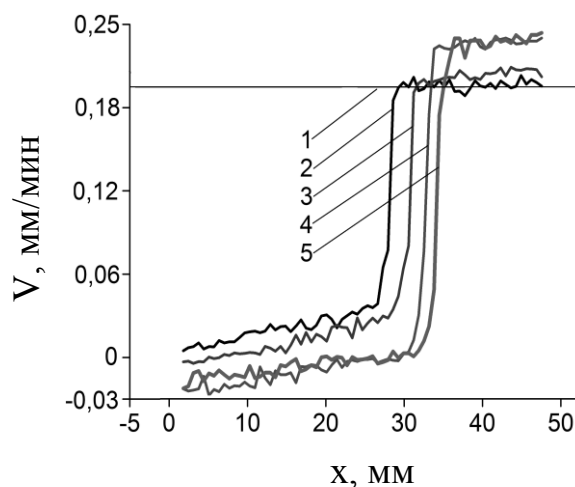
Третья глава «Влияние электрических полей на пластическую деформацию металлических материалов» посвящена исследованию влияния импульсного электрического тока на локализацию пластической деформации малоуглеродистой стали 08пс. На рисунке 3 представлены зависимости скорости смещений от продольной координаты в различные моменты времени на стадии площадки текучести, полученные методом двухэкспозиционной спекл-интерферометрии как при воздействии импульсного электрического тока так и в его отсутствие. Амплитуда токового импульса составляла 3500 А

(амплитудное значение плотности тока 175 А/мм^2). Длительность импульса 100 мкс, период пропускания 100 мс (частота следования импульсов 10 Гц). Импульсы электрического тока подавались в течение 30 с после достижения площадки текучести.



а)

1 – Постоянная скорость захвата 0,2 мм/мин
2 – распределение скорости спеклов при $t = 380 \text{ с}$; 3 – 390 с ; 4 – 400 с ; 5 – 402 с



б)

1 – Постоянная скорость захвата 0,2 мм/мин; 2 – распределение скорости спеклов при $t = 402 \text{ с}$; 3 – 425 с ; 4 – 440 с ; 5 – 450 с

Рисунок 3 – Зависимости продольной скорости смещения от продольной координаты в различные моменты времени

Оценка скорости очагов локализации из хронограмм съемки спеклов, показала увеличение ее значений на 65%. Картины распределения скоростей продольных смещений от координаты имеет вид профиля «ударного перехода». При $x=0$ скорость движения материала равна нулю (неподвижный захват), а на правом конце кривой скорость материала равна скорости растяжения, задаваемой испытательной машиной. При отсутствии тока (рисунок 3а) значение скорости растяжения для всех моментов времени остается одинаковым. Пропускание тока приводит к тому, что скорости деформации становятся различными – происходит расщепление (рисунок 3б), которое может быть связано с эффектом расщепления энергетических уровней электрическим полем. Другой возможной причиной увеличения скорости очагов локализации является неоднородное распределение температуры в зеренной структуре материала, возникающее из-за различия электрических сопротивлений тела и границы зерна и приводящее к облегчению трансляционного и ротационного движения деформируемого материала.

Для создания модели локализации пластической деформации при воздействии электрического тока использовался описанный в главе 2 подход,

согласно которому деформируемый материал рассматривается как двухфазная гетерогенная среда. Первая фаза является сжимаемой. Ее уравнение состояния $p = C\rho_e$. Уравнение состояния второй фазы $\rho_s = const$. В этом случае поведение деформируемого материала будет описываться системой уравнений (1). Предполагалось, что $\alpha / \varphi = const$. Тогда третье уравнение системы (1) примет вид:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + u_2 \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{P}{\alpha} \frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial}{\partial x} \left(B \alpha P \frac{\partial P}{\partial x} \right), \quad (16)$$

где $B = \alpha / \varphi = const$. Поиск решения в виде бегущей волны $\alpha(x - u_0 t)$, $u_1(x - u_0 t)$, $u_2(x - u_0 t)$, $\rho_1(x - u_0 t)$, $P(x - u_0 t)$ и последующие преобразования приводит к следующему:

$$u_0 = ((-1 + \alpha_1)u_1^* + (1 - \alpha_2)u_2^*) / (\alpha_1 - \alpha_2) \quad (17)$$

$$(1 - \alpha_1) \ln \tilde{u} + (-1 + \alpha_2) \ln(1 - \tilde{u}) + \alpha \ln(\tilde{u} + \beta) = \eta + C$$

$$\text{где } \beta = \frac{-1 + \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2}, \quad \alpha = \frac{(\alpha_1 \alpha_2 - 1)(\alpha_1 - \alpha_2)}{\alpha_1 \alpha_2}, \quad \eta = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)^3}{\alpha_1 \alpha_2} B \xi, \quad \tilde{u} = \frac{u_2}{u^*},$$

$\xi = x - u_0 t$, α_1 и α_2 – объемные доли первой фазы на границе очага локализации, u_1^*, u_2^* – скорость смещений на границе очагов локализации. Первое уравнение (17) определяет предельную скорость движения очага локализации, а второе представляет собой уравнение эволюции скорости смещений при условии, что $u_1^* = 0$, $u_2^* = u^*$, где u^* – скорость траверсы испытательной машины. Частные случаи второго уравнения (2.2): $(1 - \alpha_1) \ln \tilde{u} + \alpha \ln \beta = \eta + C$ при $\tilde{u} \geq 0$ и $(-1 + \alpha_2) \ln(1 - \tilde{u}) + \alpha \ln(\beta + 1) = \eta + C$ при $\tilde{u} \approx 1$ используются для того чтобы определить объемные доли α на границах «ударного перехода». Графики на рисунке 3 необходимо перестроить в координатах $x/L - \ln(u_2/u^*)$ и $x/L - \ln(1 - (u_2/u^*))$, где L – длина рабочей части образца. Затем по значениям коэффициентов, стоящих при $\ln(u_2/u^*)$, $\ln(1 - (u_2/u^*))$ найти α . Аппроксимация данных методом наименьших квадратов показала, что в отсутствие тока значения $\alpha_1 = 0,925$, $\alpha_2 = 0,838$. При пропускании импульсного электрического тока значение объемной доли $\alpha_1 = 0,901$, $\alpha_2 = 0,839$. Соответственно значение скорости ударного перехода при наличии тока $u_0 = 0,517$ мм/мин, а в его отсутствие $u_0 = 0,373$ мм/мин, что совпадает с экспериментальными результатами и говорит об адекватности предложенной фильтрационной модели электропластической деформации.

Четвертая глава «Модели формирования микро и наноструктурно-фазовых состояний металлов и сплавов при воздействии концентрированных потоков энергии» посвящена изучению механизмов формирования волнообразного рельефа границы раздела «покрытие/подложка» и образования микро и наноструктур в металлических материалах, подвергнутых комбинированной обработке, включающей воздействие плазмой электрического взрыва

проводников и последующую обработку низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками. В параграфе 4.1 представлены результаты численного моделирования взаимодействия плазмы электрического взрыва проводников с поверхностью подложки из титана и силумина. На основе данных сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии предполагалось, что формирование рельефа поверхности обусловлено комбинированной неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора. Рассматривалась устойчивость плоского стационарного течения двухслойной несжимаемой жидкости в поле массовых сил. Выбиралось направление оси x вдоль границы раздела между слоями, а ось y - перпендикулярно x и направлена в сторону второго слоя. Первый слой $(-l < x < l, -h_1 < y < \eta(x, t))$ занимает жидкость с вязкостью ν_1 и плотностью ρ_1 . Вторым слоем $(-l < x < l, \eta(x, t) < y < h_2)$ является жидкость с вязкостью ν_2 и плотностью ρ_2 , которая движется с постоянной скоростью U_0 , направленной вдоль оси x и с ускорением a , которое направлено вдоль оси y . Для слоев 1 и 2 запишем уравнения Навье-Стокса:

$$\rho_n \left(\frac{\partial \vec{u}_n}{\partial t} + (\vec{u}_n \cdot \nabla) \vec{u}_n \right) = -\nabla p_n + \mu_n \Delta \vec{u}_n + \rho_n \vec{a}_n, \quad (18)$$

$$\nabla \cdot \vec{u}_n = 0,$$

где \vec{u} – вектор скорости, p – давление, \vec{a} – ускорение, ρ – плотность, μ – динамическая вязкость, $n = 1, 2$ – номера слоев. Система (18) решалась численно с помощью метода конечных элементов при начальных условиях $u_2 = U_0$,

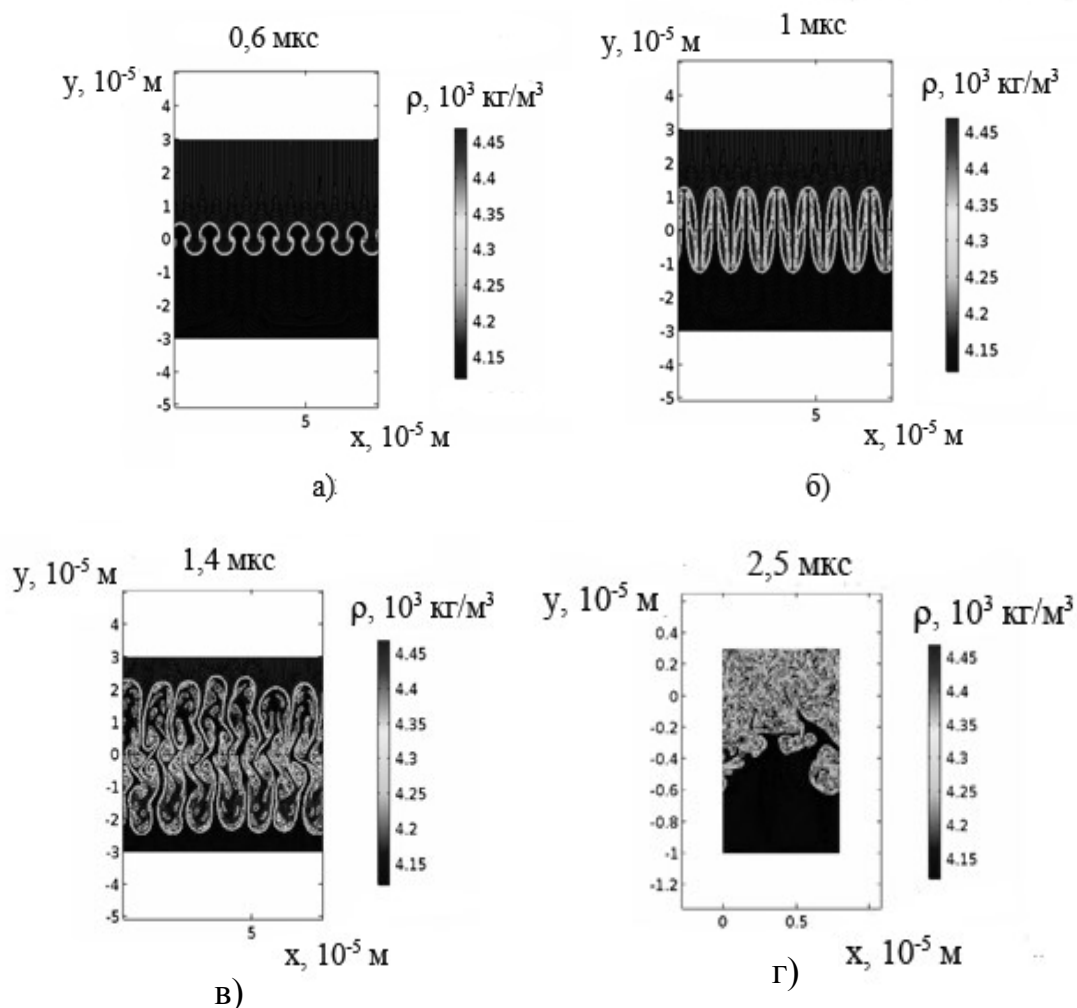
$v_2 = V_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} y\right)$, где λ – длина волны возмущения, определяемая из анализа дисперсионного уравнения (7). Эволюция поверхности раздела изучалась с помощью метода фазового поля. Метод заключается в расчете скалярной функции ϕ на всей расчетной области. Динамика двухфазного течения описывается уравнениями Кана – Хилларда:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \chi w \nabla \psi, \quad (19)$$

$$\psi = -\nabla \cdot \varepsilon^2 \nabla \phi + (\phi^2 - 1)\phi,$$

где χ – параметр подвижности, w – плотность энергии смеси, ε – параметр, определяющий толщину переходного слоя и равный половине размера ячейки сетки. В расчетах параметр подвижности задавался равным $\chi = 1 \text{ м} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}^{-1}$. Плотность энергии смеси и толщина переходного слоя связаны с коэффициентом поверхностного натяжения соотношением: $w = 3\varepsilon\sigma / \sqrt{8}$.

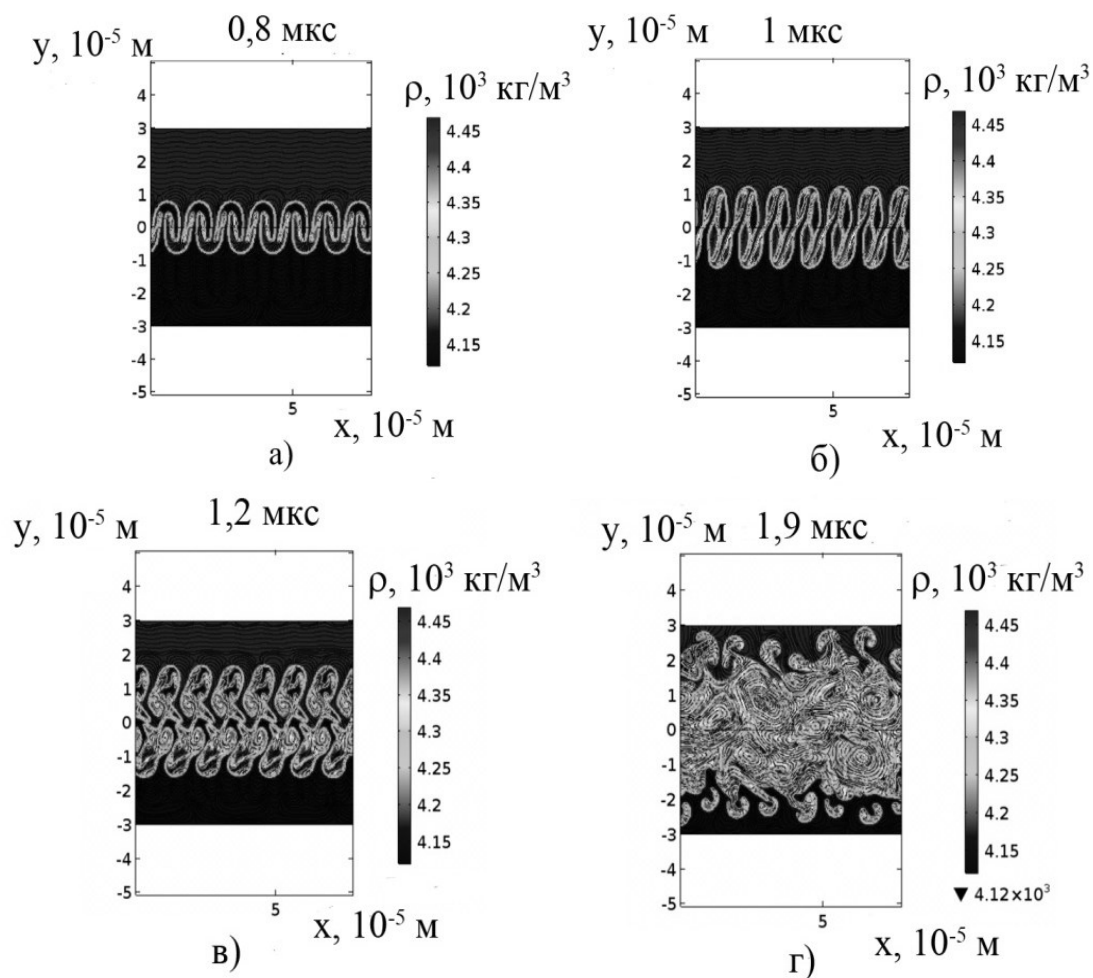
Рисунок 4 демонстрирует распределение плотностей иттрия и титана в различные моменты времени при значении горизонтальной компоненты скорости натекания 0 м/с, в момент времени 0,6 мкс поверхность раздела принимает грибообразную форму (рисунок 4 а), что соответствует развитию неустойчивости Рэлея-Тейлора. В моменты времени от 1 до 1,4 мкс, происходит рост этого возмущения, а затем разрушение ножки «гриба» (рисунок 4 б, в).



а – 0,6 мкс; б – 1 мкс; в – 1,4 мкс; г – 2,5 мкс

Рисунок 4 – Развитие неустойчивости Рэля-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца при $u_0 = 0$ м/с

Причиной этого распада является возникновение и развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, которая в свою очередь образуется вследствие тангенциального разрыва вертикальной компоненты скорости на поверхности ножки «гриба». В моменты времени $t > 1.4$ мкс наблюдаются процессы интенсивного перемешивания иттрия и титана (рисунок 4 г), причем вихри проникают на глубину ≈ 80 мкм, что объясняет наличие иттрия на расстояниях от поверхности обработки, превышающих глубину проникновения по механизму диффузии. Учет влияния поперечной скорости качественно меняет картину течения расплавленных материалов. При значении поперечной компоненты скорости 10 м/с преобладающей неустойчивостью становится неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, о чем говорит форма вихрей в моменты времени до 1 мкс (рисунок 5). При $t > 1$ мкс происходит распад вихрей с образованием «капель», размеры которых изменяются от 1,25 мкм до 7 мкм. Помимо распада на капли во всех случаях наблюдается процесс объединения малых «капель» в большие.



а – 0,8 мкс; б – 1 мкс; в – 1,2 мкс; г – 1,9 мкс

Рисунок 5 – Развитие неустойчивости Рэля-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца при $u_0 = 5$ м/с

Полученная в результате численного моделирования форма границы раздела имеет сходство с рельефом поверхности раздела «покрытие/подложка» наблюдаемым в эксперименте. Это позволяет сделать вывод о том, что учет поперечной скорости позволяет адекватно объяснить формирование волнообразного рельефа границы раздела покрытия и подложки. Подобная картина наблюдается и в системе Al-Si-Y с той лишь разницей, что комбинированная неустойчивость Рэля-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца протекает быстрее, чем в случае Ti-Y, что обусловлено меньшей по сравнению с титаном плотностью силумина и большим ускорением продуктов электрического взрыва. Еще одним отличием от системы Ti-Y является то, что неустойчивость Кельвина-Гельмгольца начинает преобладать над неустойчивостью Рэля-Тейлора при скоростях более 50 м/с. Это позволяет объяснить тот факт, что волнообразный рельеф поверхности в этом случае является менее развитым.

В параграфе 4.2 проведено теоретическое исследование формирования поверхностных микро- и наноструктур в титане, легированном иттрием, и силумине, легированном оксидом иттрия, с помощью электрического взрыва проводников. В основу модели были положены представления о гидродина-

мической природе образования данных структур по механизму комбинированной термо-, концентрационно-, испарительно-капиллярной и термоэлектрической неустойчивости. Путем анализа дисперсионных уравнений изучалась начальная стадия данной неустойчивости, в которой возникают малые возмущения на поверхности расплава. Для учета влияния градиента концентрации легирующих элементов в систему уравнений (5), (11) добавлялось уравнение конвективной диффузии

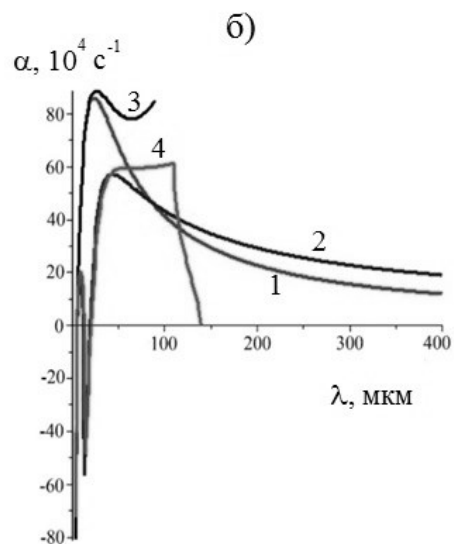
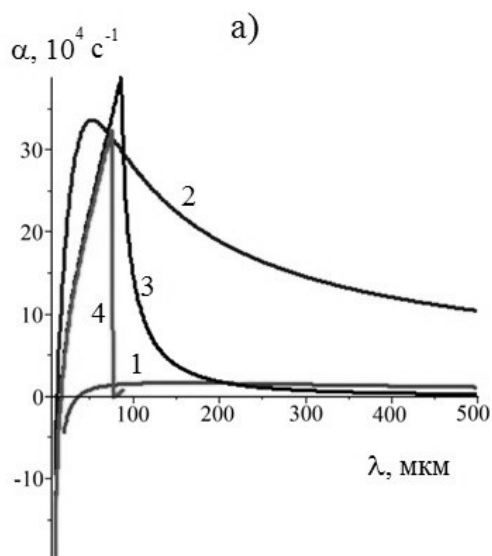
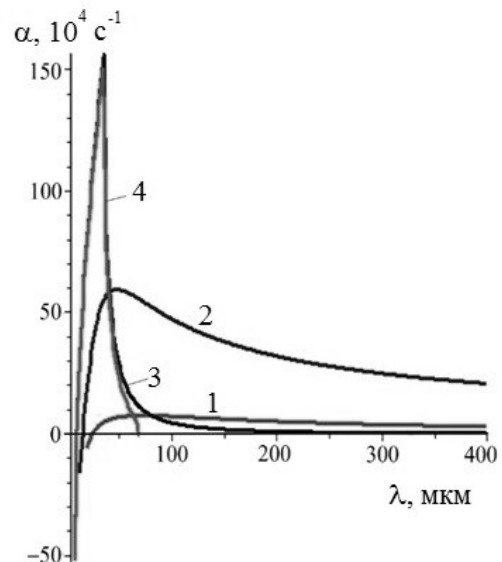
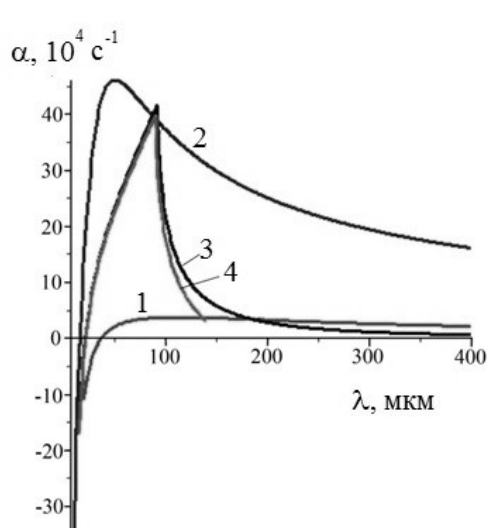
$$\frac{\partial C}{\partial t} + wG_1 = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right), \quad (20)$$

а граничные условия для касательной компоненты напряжений (12) переписывались в следующем виде:

$$\rho v \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) = \sigma_T \frac{\partial T}{\partial x} + \sigma_C \frac{\partial C}{\partial x} + \varepsilon \varepsilon_0 E_0^2 \frac{\partial a}{\partial x}. \quad (21)$$

В результате было получено дисперсионное уравнение, аналогичное (15), в котором произведение $\omega_T \text{Pr}$ заменено на $\omega_T \text{Pr} + \omega_C \text{Sc}$, где $\text{Sc} = \nu / D$ – число Шмидта, $\omega_C = \frac{\sigma_C G_1}{\rho \nu}$, G_1 – градиент концентрации. Применение низкочастотного приближения оправдано лишь в том случае, если $\text{Pr} \ll 1$ и $\text{Sc} \ll 1$.

Для жидких металлов число Шмидта принимает значения ~ 10 . Эти оценки сделаны в предположении неподвижной жидкости. В действительности конвективное течение усиливает процессы массопереноса, поэтому значения коэффициента диффузии будем считать на порядок большим, чем коэффициент кинематической вязкости. Из полученного дисперсионного уравнения находились зависимости скорости роста возмущений поверхности расплава, представленные на рисунке 6. В случае системы Ti-Y (рисунок 6а) без учета влияния градиента концентрации, термоэлектрических и испарительных эффектов максимальное значение скорости роста будет наблюдаться при длине волны 113 мкм (рисунок 6а, кривая 1). При значениях напряженности термоэлектрического поля $10^5 - 10^6$ В/м (рисунок 6а, кривая 2) максимальное значение скорости роста наблюдается при $\lambda_m = 50$ мкм. Учет процессов испарения вещества приводит к увеличению λ_m до 92 мкм при давлении отдачи паров $2 \cdot 10^5$ Па (рисунок 6а, кривая 3). Термоэлектрический эффект в этом случае не оказывает никакого влияния на неустойчивость поверхности раздела (рисунок 6а, кривая 4). Влияние градиента концентрации иттрия (рисунок 6б) проявляется в уменьшении значения λ_m до 74 мкм при отсутствии термоэлектрических эффектов и эффектов испарения (рисунок 6б, кривая 1). При учете термоэлектрических эффектов максимум скорости роста приходится на длину волны 48 мкм (Рисунок 6б, кривая 2). При испарительном давлении $2 \cdot 10^5$ Па – $\lambda_m = 36$ мкм, термоэлектрические эффекты приводит лишь к незначительному увеличению максимальной скорости роста возмущений (Рисунок 6б, кривые 3 и 4). Для системы Al-Si-Y в случае отсутствия влияния градиента концентрации иттрия (Рисунок 6 в) будет наблюдаться такая же тенденция, что и в случае системы Ti-Y.



в)

г)

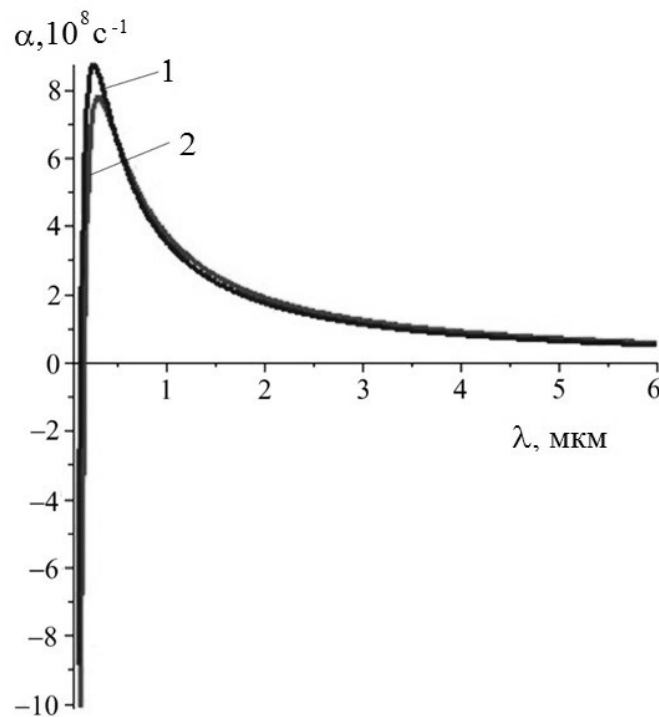
а – система Ti-Y без учета влияния градиента концентрации иттрия; б – система Ti-Y с учетом влияния градиента концентрации иттрия; в – система Al-Si-Y без учета влияния градиента концентрации иттрия; г – система Al-Si-Y с учетом данного воздействия;

1 – без учета термоэлектрических и испарительно-капиллярных явлений, 2 – с учетом только термоэлектрических явлений, 3 – при наличии термо- и испарительно-капиллярной неустойчивости, 4 – при наличии термо-, испарительно-капиллярной неустойчивости и термоэлектрических явлений

Рисунок 6– Зависимости скорости роста возмущений поверхности расплава от длины волны

При градиенте концентрации $G_1 = 10^6 \text{ м}^{-2}/\text{м}$ и $\omega_E = 0$ и $\omega_p = 0$ максимум скорости роста приходится на 25 мкм (Рисунок 6г, кривая 1). При $\omega_E \neq 0$ и $\omega_p = 0$ значение λ_m составляет 10 и 44 мкм (Рисунок 6г, кривая 2). При $\omega_E = 0$ и $\omega_p \neq 0$ максимальное значение скорости роста достигается при длине волны 27 мкм (Рисунок 6г, кривая 3). При $\omega_E \neq 0$ и $\omega_p \neq 0$ зависимость скорости роста также имеет два максимума (Рисунок 6г, кривая 4). Первый максимум приходится на

длину волны 10 мкм, а второй на длину волны 110 мкм. Наличие первого максимума обусловлено, по-видимому, взаимодействием концентрационно-капиллярной и термоэлектрической неустойчивостей, а второй наличием градиента температур. Полученные результаты дают адекватное объяснение образованию поверхностно-периодических структур микрометрового диапазона. Образование ячеистых структур субмикро- и наноразмерного диапазона в рамках низкочастотного приближения, также как и в случае, рассмотренном выше, возможно при значении термоэлектрического коэффициента $\gamma = 0,1$ В/К, что соответствует напряженности электрического поля $E_0 \sim 10^6 - 10^7$ В/м (Рисунок 7 кривые 1 и 2). Для титановых сплавов $\lambda_{cr} = 0,17$ мкм и $\lambda_m = 0,3$ мкм, а для алюминиевых – $\lambda_{cr} = 0,13$ мкм и $\lambda_m = 0,26$ мкм. Показано, что длина волны, на которую приходится максимум скорости роста возмущений поверхности раздела «плазма/расплав», с увеличением плотности энергии пучка электронов в диапазоне от 10 до 50 Дж/см² уменьшается вне зависимости от материала обрабатываемого изделия.



1 – система Ti-Y; 2 – система Al-Si-Y

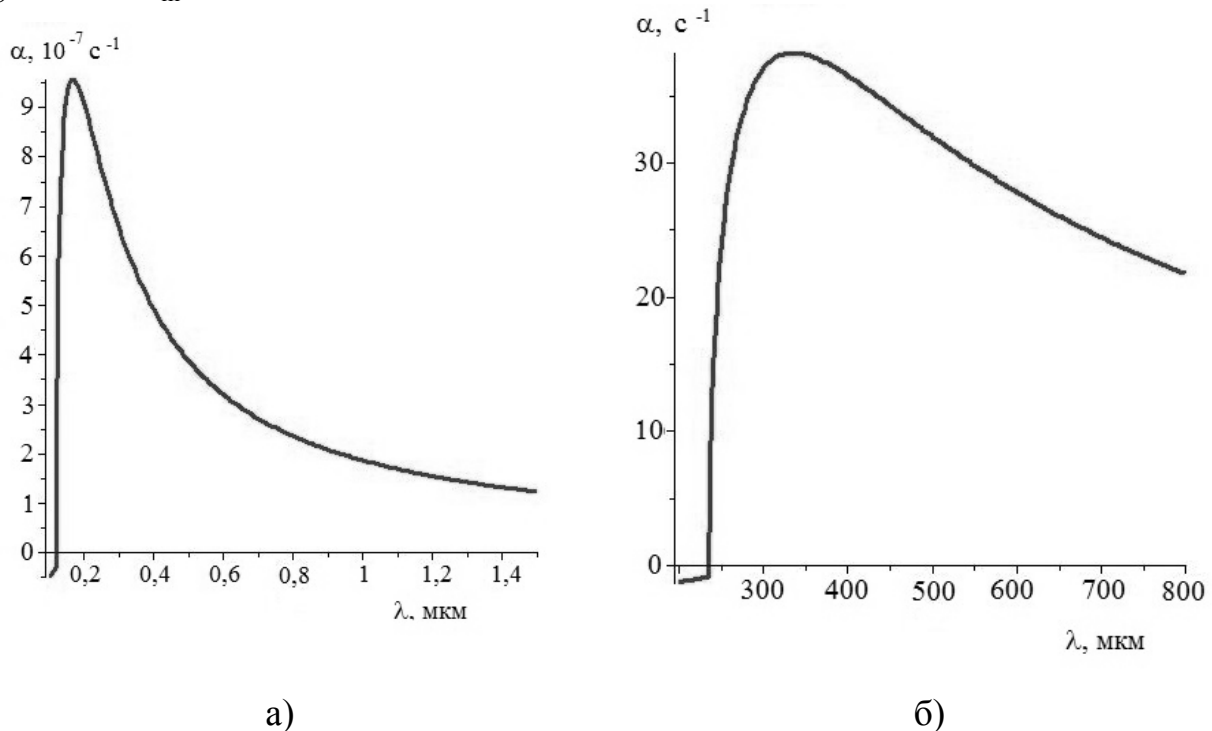
Рисунок 7 – Зависимости скорости роста возмущений поверхности раздела «плазма / расплав» при значении термоэлектрической постоянной 10^{-1} В/К

В параграфе 4.3. изложены результаты моделирования процесса дробления частиц второй фазы в алюмо-кремниевом сплаве в зоне термического влияния низкоэнергетического сильноточного электронного пучка. Основным механизмом распада данных частиц является неустойчивость поверхности раздела между частицей и матрицей. Она образуется вследствие несоответствия модулей упругости и коэффициентов линейного расширения алюминия и кремния на границе включения и матрицы. В результате возникают механические напряжения, которые приводят к разрушению включения. Оценка величины

этих напряжений методами теории упругости показала, что при температуре эвтектики оно может достигать порядка 1 ГПа. Начальная стадия этой неустойчивости изучалась с привлечением методов теории пластин и оболочек. В рамках данной теории, оценено значение критического напряжения в приближении защемленных концов пластины и шарнирно опертых пластин, которое составляет $\sim 10^7 - 10^9$ Па. Это позволяет сделать вывод о том, что предложенный механизм дробления частиц кремния в зоне термического влияния электронного пучка является наиболее вероятным. С другой стороны, механические напряжения, возникающие на границе раздела частицы и матрицы являются сжимающими. Это позволяет сделать предположение о том, что на этой границе может возникнуть неустойчивость Рэлея-Тейлора. Для проверки этого утверждения использовалась зависимость скорости роста возмущений поверхности раздела от длины волны, при этом скорость второго слоя считаем равной нулю. Максимальное значение скорости роста приходится на длину волны 626 нм, что в 6 раз выше, чем наблюдаемые размеры частиц кремния. Такое отклонение объяснялось тем, что при расчетах температура включения кремния и алюминиевой матрицы считалась постоянной, аналогичной и равной эвтектической температуре силумина.

Пятая глава «Механизмы и модели формирования структурно-фазовых состояний в рельсовой стали при длительной эксплуатации» посвящена поиску механизмов и созданию физико-математических моделей формирования микро и наноструктурных состояний дифференцированно закаленной рельсовой стали перлитного класса при интенсивной пластической деформации. В основу данных моделей положен механизм распада цементитных пластин при интенсивной пластической деформации на основе представлений о возникновении комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора на границе раздела слоев цементита и феррита. Также как и Главе 2 рассматривалась устойчивость плоского стационарного течения двухслойной несжимаемой жидкости. Анализ возмущений поверхности раздела слоев проводился с помощью дисперсионного уравнения (7) при «непроницаемых» граничных условиях (5) и «перколяционных» граничных условиях (9). Для нахождения зависимости $\alpha = \alpha(\lambda)$ толщина слоя феррита H задавалась равной 100 нм, а толщина слоя цементита $h = 10$ нм. Вязкости слоев считались одинаковыми и равными 10^{-5} Па·с. Плотность феррита $\rho_2 = 7800$ кг/м³, а плотность цементита $\rho_1 = 7600$ кг/м³. Межфазное поверхностное натяжение равнялось 0,01 Н/м. На рисунке 8 приведены зависимости скорости роста возмущений от длины волны при значении скорости второго слоя 10 м/с и 0,01 м/с. Из данного рисунка следует, что максимум скорости роста будет приходиться на длину волны 169 нм (рисунок 8 а). Размеры цементитных частиц по данным электронно-микроскопических исследований составляют 100..150 нм, что позволяет сделать вывод о соответствии представленной модели эксперименту. Однако относительные скорости слоев по данным эксперимента составляют значение порядка 0,01 м/с. Уменьшение значения скорости до 0,01 м/с приводит к смещению максимума скорости роста в субмиллиметровый диапазон

длин волн $\lambda_m = 336$ мкм (рисунок 8 б). Применение к уравнению (7) переменных Ламба показывает ($b = 0$), что при $u_0 = 10$ м/с – $\lambda_m = 113$ нм, а при $u_0 = 0,01$ м/с – $\lambda_m = 320$ мкм.



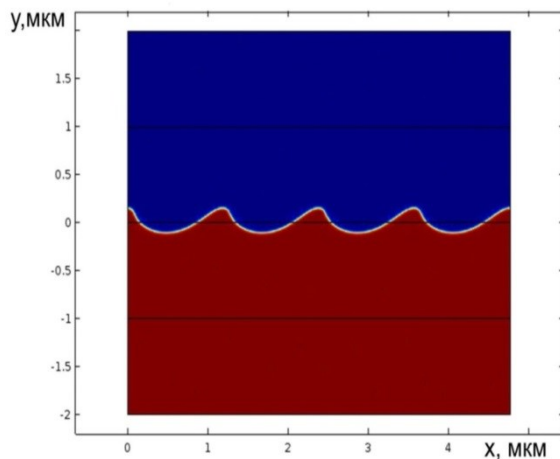
а – $u_0 = 10$ м/с; б – $u_0 = 0,01$ м/с

Рисунок 8 – Зависимости скорости роста возмущений поверхности раздела от длины волны

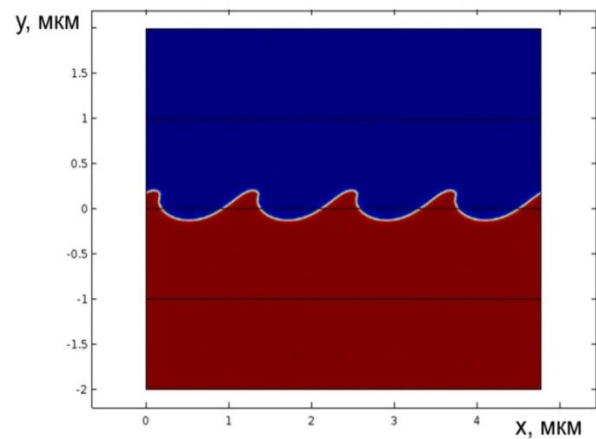
В случае «перколяционных» граничных условий будут наблюдаться такие же значения длины волны, на которую приходится максимум скорости роста. Такое расхождение результатов моделирования с экспериментальными данными при значении скорости $u_0 = 0,01$ м/с объясняется тем, что при получении зависимости $\alpha = \alpha(\lambda)$ пренебрегалось влиянием ускорения одного из слоев. Как показывают результаты Главы 4, ускорение слоя оказывает существенное влияние на формирование рельефа поверхности раздела, путем возникновения неустойчивости Рэлея-Тейлора. Оценим величину ускорения одного из слоев. Для этого воспользуемся следующей формулой: $g = P/\rho_1 a_0$, где $P \approx 0,1\sigma_T$, $\sigma_T \approx 700$ МПа – предел текучести, $a_0 \approx 10$ нм – амплитуда возмущений. Тогда $g \approx 10^{11}$ м/с². Это достаточно большая величина, которая оказывает существенное влияние на смещение скорости роста возмущений в различные диапазоны, что позволяет сделать вывод о превалирующем влиянии неустойчивости Рэлея-Тейлора. В этом случае максимум скорости роста возмущений при $u_0 = 10$ м/с будет наблюдаться при $\lambda_m = 123$ нм, а при $u_0 = 0,01$ м/с – $\lambda_m = 323$ нм, что позволяет сделать вывод об адекватности представленной модели распада пластин цементита. Следовательно, причиной распада цементитной пластины является комбинированная неустойчивость Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора. Применение вязкоупругого приближения показало, что при значениях вязкости слоев порядка 2000 Па·с, времени релаксации $\tau_1 \approx \tau_2 \approx 10^{-8}$ с и

толщине слоев $H = 100$ мкм и $h = 10$ мкм значение длины волны, на которую приходится максимум скорости роста $\lambda_m = 3,8$ мкм ($u_0 = 0,01$ м/с), что практически совпадает с наблюдаемыми размерами областей, занятых разрушенным перлитом ($\sim 4 - 8$ мкм).

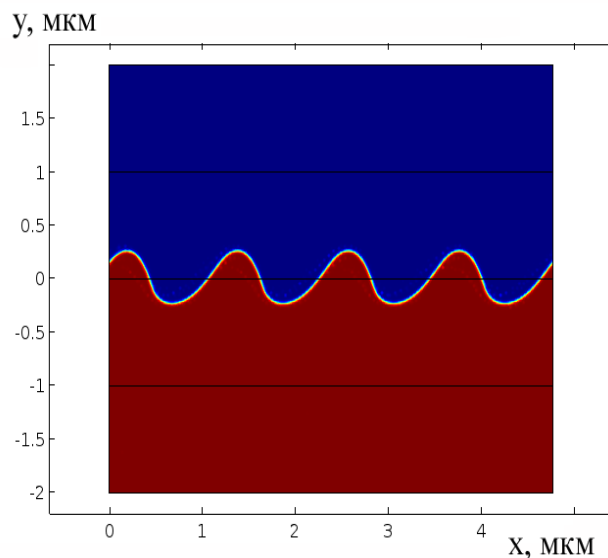
Анализ нелинейной стадии неустойчивости Кельвина-Гельмгольца проводился методом конечных элементов. На рисунке 9 продемонстрирована эволюция поверхности раздела сред. Видно, что сначала идет постепенное нарастание возмущений границы раздела (рисунок 9 а,б).



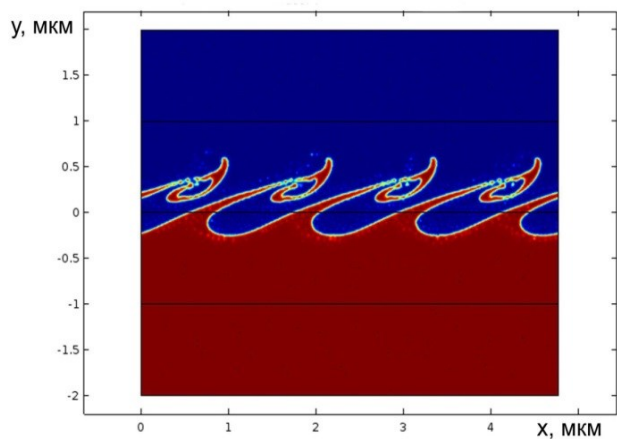
а)



б)



в)



г)

а – 8 нс; б – 10 нс; в – 22 нс; г – 45 нс

Рисунок 9 – Эволюция возмущений поверхности раздела материалов

Затем при $t = 10$ нс (рисунок 9 в) происходит опрокидывание волнового фронта. Формирование вихря начинается в момент времени 22 нс (рисунок 9 г). При $t > 22$ нс вихревая структура фрагментируется и образуются капли. Размеры этих капель варьируются от ~ 90 нм до ~ 242 нм. Помимо распада вихря на капли, в режиме 1 наблюдается процесс объединения малых капель в

большие. Таким образом, учет нелинейности при исследовании неустойчивости Кельвина-Гельмгольца приводит к тому, что наблюдается два процесса генерация наноразмерных «капель», вследствие распада вихря и объединения их в субмикроразмерные частицы.

В шестой главе «Применение результатов диссертационного исследования в процессах обработки материалов внешними энергетическими воздействиями» приведены примеры практического использования результатов диссертационного исследования. **Параграф 6.1** посвящен применению результатов 2-й и 4-й главы диссертации в получении покрытий, обладающих высокой адгезионной прочностью, электровзрывным методом. Такая прочность достигается путем формирования развитого волнообразного рельефа, механизм которого является, согласно результатам главы 4, комбинированная неустойчивость Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора. Этот рельеф способствует диспергированию концентраторов напряжений, что и является причиной повышения их адгезионной прочности и износостойкости. Длина волны, на которую приходится максимум скорости роста возмущений поверхности раздела «покрытие/подложка» определяет такую характеристику ее рельефа как расстояние между «горбами». Для нахождения этой длины волны и ее связи с параметрами внешнего воздействия численно решалось дисперсионное уравнение (7) в двух случаях: 1) $u_0 = 0$ и $g \neq 0$; 2) $u_0 \neq 0$ и $g \neq 0$. Ускорение плазменного потока оценивалось как $g = v^2 / 2s$, где $v = 6,75 \cdot 10^3 (CU^2 / 2\tau_i)^m$ – его продольная скорость, C – емкость батареи, U – зарядное напряжение, m – показатель степени, зависящий от типа источника ($m = 0,05$ для электровзрывных источников). s – расстояние от сопла до поверхности образца. На рисунке 10 а демонстрируются зависимости длины волны, на которую приходится максимум скорости роста от величины зарядного напряжения на примере систем Ti-Zr и Ti-Nb. Установлено, что для системы Ti-Zr эта зависимость имеет вид $\lambda_m = 1,7689U^{-0,084}$ с коэффициентом корреляции 0,999. Для системы Ti-Nb – $\lambda_m = 2,1413U^{-0,092}$ с коэффициентом корреляции 0,9997 (здесь величина зарядного напряжения измеряется в кВ). Зависимости λ_m от времени импульса при зарядном напряжении 1,8 кВ представлены на рисунке 10б. Аппроксимация полученных данных методом наименьших квадратов показывает, что в случае системы Ti-Zr длина волны, на которую приходится максимум скорости роста возмущений, зависит от времени импульса по уравнению $\lambda_m = 1,3917\tau^{0,0412}$ с коэффициентом корреляции 0,9999, а для системы Ti-Nb – $\lambda_m = 1,6415\tau^{0,046}$ с коэффициентом корреляции 0,9995. Учет влияния неустойчивости Кельвина-Гельмгольца путем включения в дисперсионное уравнение продольной скорости u_0 приводит к уменьшению длины волны, на которую приходится максимум скорости роста возмущений. Зависимости λ_m от U и λ_m от τ имеют такой же вид, что и при отсутствии скорости. Так, например, при $u_0 = 10$ м/с эти зависимости для системы Ti-Zr подчиняются уравнениям $\lambda_m = 1,5825U^{-0,071}$ и

$\lambda_m = 1,2898\tau^{0,0354}$ с коэффициентом корреляции 0,9999 и уравнениям $\lambda_m = 2,0522U^{-0,089}$ и $\lambda_m = 1,5851\tau^{0,0442}$ с коэффициентом корреляции 0,9999 в случае системы Ti-Nb.

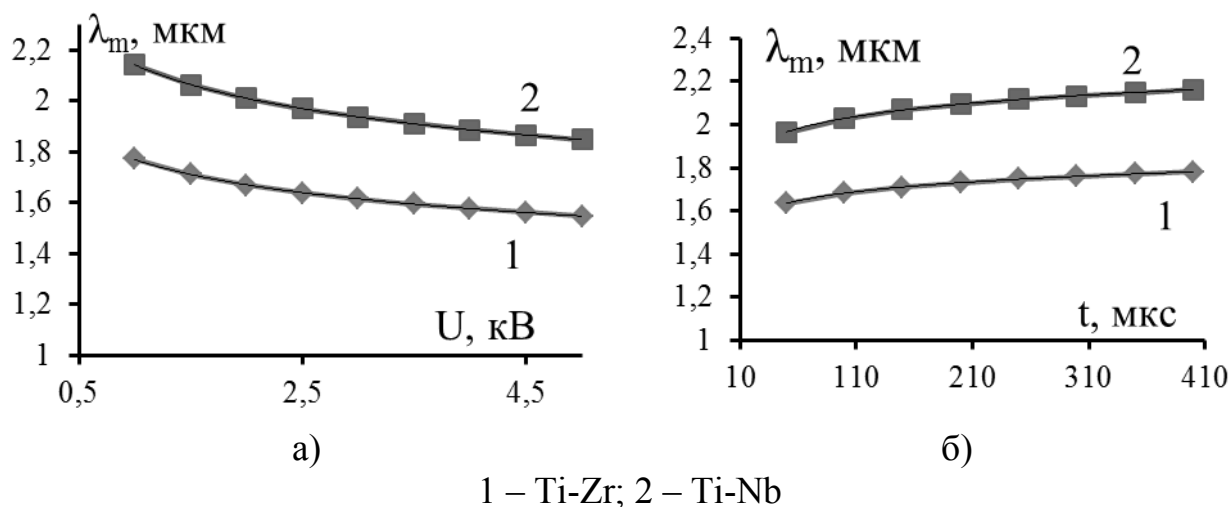


Рисунок 10 – Зависимости длины волны, на которую приходится максимум скорости роста от величины зарядного напряжения (а), от времени импульса (б)

Таким образом, следует заключить, что для поиска режима электровзрывной обработки для создания развитого рельефа поверхности раздела «покрытие/ подложка», обеспечивающего высокую степень диспергирования концентраторов механических напряжений и, соответственно, повышенную адгезионную прочность, необходимо либо повышать зарядное напряжение, либо уменьшать время импульса. Полученные зависимости применены при отработке оптимальных режимов нанесения износостойких покрытий, обеспечивающих повышение эксплуатационной стойкости в 1,5 раза.

В параграфе 6.2 изложено применение комбинированной магнитогидродинамической неустойчивости, и неустойчивости Кельвина-Гельмгольца к решению задачи поиска условий распада струи расплавленного материала электрода на капли при электродуговой наплавке. Решение этой задачи проводилось в два этапа. На первом этапе рассматривалась начальная стадия неустойчивости цилиндрического столба расплавленного металла без учета влияния магнитного поля, на втором – неустойчивость Кельвина-Гельмгольца с учетом воздействия магнитного поля методами конечных элементов. Показано, что в системе «железо/аргон» при значении скорости газа ~ 100 м/с и диаметра струи ~ 10 мм возникают два максимума в миллиметровом диапазоне. Результаты конечно-элементного моделирования показали, что при значениях силы тока $I = 100$ и 300 А сила Лоренца не оказывает никакого влияния на неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. При скоростях ~ 6 м/с поверхность устойчива и силы тока 300 А недостаточно для возникновения комбинированной неустойчивости. Для развития МГД неустойчивости необходимы силы тока порядка 1000 А. Расчеты с тонким слоем (10 мкм) показали, что основную

роль в разрушении струи на капли играет – возмущение коэффициента поверхностного натяжения, т. е. термокапиллярный эффект. Полученный результат свидетельствует о необходимости перехода плазмотрона на импульсное питание. Полученные результаты использованы для сокращения времени поиска оптимальных режимов нанесения износостойких покрытий электродуговой наплавкой при ремонте и восстановлении прокатных валков, натяжных колес и шнеков для транспортировки сырья, а также футеровочных плит.

В параграфе 6.3. предложена модель износа внутренних поверхностей ковша экскаватора при длительной эксплуатации. Методом конечных элементов решены уравнения движения сыпучей среды в ковше экскаватора. Сыпучая среда моделировалась как несжимаемая жидкость. Получены распределения скоростей частиц среды по поверхности ковша. Установлено, что на линии соприкосновения днища и задней крышки ковша формируется вихревая структура, приводящая к тому, что в этих местах наблюдается повышенный износ, характеризующийся полным исчезновением бронирующей сетки. По результатам моделирования было рекомендовано увеличение толщины защитных покрытий в 2 раза на стыке днища и задней крышки ковша экскаватора.

В приложении приведены акты и справки об использовании результатов диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Методами современной физики конденсированного состояния выявлены механизмы и созданы модели воздействия электрических полей (электрический ток), концентрированных потоков энергии (гетерогенные плазменные потоки, низкоэнергетические сильноточные электронные пучки) и интенсивной пластической деформации (по схеме длительной эксплуатации на железной дороге) на процессы формирования и эволюции микро- и наноструктурно-фазовых состояний металлических материалов.

1. Методами двухэкспозиционной спекл-интерферометрии установлено, что воздействие импульсного электрического тока (амплитуда тока 3500 А, длительность импульса 100 мкс, период пропускания 100 мс) при активной пластической деформации растяжением металлических материалов приводит к увеличению скорости очагов локализации в 1,65 раза. Это обусловлено различными значениями электрического сопротивления тела и границы зерна, которые приводят к их неоднородному нагреву и, как следствие, облегчению трансляционного движения зерен. С помощью двухфазной фильтрационной модели пластического течения материалов проведен расчет предельной скорости очагов локализации деформации при воздействии электрического тока. Установлено, что электрический ток приводит к увеличению их скорости в 1,38 раза. Это обусловлено изменением объемной доли возбужденной фазы на его границах. Сравнение с результатами эксперимента показало адекватность предложенной модели. Анализ устойчивости пластического течения относительно малых гармонических возмущений в рамках фильтрационной модели

показал, что критическая длина волны, при которой еще происходит неограниченное нарастание этих возмущений, зависит от начального значения объемной первой фазы, плотности, динамической вязкости материала и скорости звука.

2. Предложен механизм образования волнообразного рельефа поверхности раздела «покрытие/подложка» при напылении покрытий гетерогенными плазменными потоками, созданными электрическим взрывом порошка иттрия, на подложки из титановых и алюмо-кремниевых сплавов. Он заключается в возникновении комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора. Установлено, что для системы Ti-Y при значениях поперечной скорости до 10 м/с преобладающим типом неустойчивости является неустойчивость Рэлея-Тейлора, при скоростях больше данного значения происходит смена типа неустойчивости на неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Для системы Al-Si-Y неустойчивость Кельвина-Гельмгольца будет преобладать при значении скорости более 50 м/с, что обусловлено малой по сравнению с титаном плотностью подложки и высоким ускорением порошка иттрия $\sim 10^9$ м/с².

3. Анализ дисперсионного уравнения комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора для малых возмущений поверхности раздела «покрытие /подложка» при воздействии плазмы электрического взрыва проводников показал, что значение длины волны, на которую приходится максимум скорости роста, зависит от зарядного напряжения по закону $\lambda_m = aU^{-n}$ и от времени импульса по закону $\lambda_m = a_1\tau^{n_1}$. Для создания развитого рельефа поверхности раздела «покрытие/ подложка» необходимо либо повышать зарядное напряжение, либо уменьшать время импульса.

4. Установлен механизм образования микро- и наноструктур при электронно-пучковой обработке в сплавах систем Ti-Y и Al-Si-Y, заключающийся в возникновении на границе раздела «плазма/расплав» комбинированной термо-, испарительно-капиллярной и термоэлектрической неустойчивости. Этот механизм положен в основу модели образования поверхностных наноструктур при электронно-пучковой обработке. Анализ дисперсионного уравнения показал, что при значениях термоэлектрического коэффициента $\sim 10^{-1} - 1$ В/К максимум скорости роста приходится на длины волн субмикро- и нанометрового диапазона. Это совпадает с экспериментальными данными по размерам структур ячеистой кристаллизации. Установлено, что длина волны, на которую приходится максимум скорости роста возмущений поверхности раздела «плазма/расплав» уменьшается вне зависимости от материала обрабатываемого изделия с увеличением плотности энергии пучка электронов в диапазоне от 10 до 50 Дж/см².

5. Предложен механизм образования микро- и наноструктур в рельсовой стали при длительной эксплуатации, заключающийся в распаде пластин цементита за счет комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора. Показано, что значение вязкости деформируемой среды необходимо выбирать с учетом структурномасштабного уровня. Анализ дисперсионного уравнения для малых гармонических возмущений на границе раздела

двух вязких сред в вязко-потенциальном приближении показал, что учет ускорения второго слоя приводит к смещению максимума скорости роста возмущений поверхности раздела в субмикроразмерный диапазон при значении скорости слоя $\sim 0,01$ м/с и ускорения слоя $\sim 10^{11}$ м/с². Установлено, что для вязкоупругой жидкости Максвелла на микромасштабном уровне максимум неустойчивости приходится на длину волны $\lambda_m = 3,8$ мкм, что сравнимо с размерами областей, занятыми разрушенным перлитом.

6. Проведено математическое моделирование процессов распада струи жидкости на капли при электродуговой наплавке в предположении, что механизмом распада струи на капли являются неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и магнитогидродинамическая неустойчивость. Получено дисперсионное соотношение для неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в цилиндрической геометрии и определены условия возникновения двух максимумов в случае системы «железо/аргон». Показано, что при скорости газа ~ 100 м/с и диаметре струи ~ 10 мм возникают два максимума в миллиметровом диапазоне.

7. Результаты диссертационного исследования использованы на ООО «Вест 2002» для оптимизации режимов электродуговой наплавки порошковых композиционных материалов на поверхности ковшей экскаваторов; на ООО «Проммест» для поиска технологических режимов дополнительной плазменной обработки защитных композиционных покрытий при ремонте оборудования угольной промышленности и цементных заводов; на ООО «Ремкомплект» для оптимизации режимов нанесения износостойких покрытий. Суммарный экономический эффект составил 10 млн. рублей при доле участия автора 15%. Результаты работы внедрены в учебный процесс и использованы в научной деятельности.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Публикации в журналах, входящих перечень рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук

1. Невский, С. А. Релаксация напряжений алюминия при подключении разнородных металлов / С. А. Невский, С. В. Коновалов, В. Е. Громов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2010. – №6. – С. 49 – 51.
2. Иванов, Ю. Ф. Влияние электрического потенциала на процесс перестройки дислокационных субструктур алюминия при релаксации напряжений / Ю. Ф. Иванов, С. А. Невский, С. В. Коновалов, В. Е. Громов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия "Физико-математические науки". – 2011. – № 1 (116). – С. 78 – 81.

3. Петрунин, В. А. О влиянии слабых электрических воздействий на релаксацию механических напряжений в алюминии / В. А. Петрунин, С. А. Невский, С. В. Коновалов, В. Е. Громов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия «Естественные и технические науки». – 2011. – № 2 (115). – С. 85 – 88.
4. Петрунин, В. А. Исследование релаксации напряжений при изменении электрического потенциала поверхности алюминия, деформированного сжатием / В. А. Петрунин, С. А. Невский, С. В. Коновалов, В. Е. Громов // Вестник Тамбовского университета. Серия «Естественные и технические науки». – 2011. – Т. 16. – Вып. 3. – С. 826 – 828.
5. Невский, С. А. Влияние внешних электрических воздействий на процесс релаксации механических напряжений алюминия / С. А. Невский, С. В. Коновалов, С. Н. Кульков, В. Е. Громов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2011. – № 4. – С. 23 – 26.
6. Невский, С. А. Эволюция дислокационной субструктуры алюминия при релаксации напряжений в условиях слабых электрических воздействий / С. А. Невский, Ю. Ф. Иванов, С. В. Коновалов, В. Е. Громов // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 4. – С. 45 – 51.
7. Невский, С. А. Влияние слабых электрических потенциалов на ползучесть алюминия / С. А. Невский, С. В. Коновалов, И. А. Комиссарова, В. Е. Громов // Физика и химия обработка материалов. – 2013. – № 4. – С. 15 – 19.
8. Сарычев, В. Д. Моделирование воздействия электрического тока на пластическую деформацию материалов / В. Д. Сарычев, А. Ю. Гагарин, С. А. Невский, А. Ю. Грановский // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 315 – 322.
9. Сарычев, В. Д. Фильтрационная модель пластической деформации материалов / 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.
10. Сарычев, В. Д. Модель образования наноструктур в рельсовой стали при интенсивной пластической деформации / В. Д. Сарычев, С. А. Невский, В. Е. Громов // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 6. – С. 25 – 29.
11. Сарычев, В. Д. Модель формирования гетерогенного плазменного потока при электрическом взрыве проводников в плазменном ускорителе с коаксиальным расположением электродов / В. Д. Сарычев, А. Ю. Грановский, С. А. Невский, В. Е. Громов, М. В. Темлянцев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2017. – Т. 14. – № 3. – С. 337 – 346.
12. Невский, С. А. Математическая модель образования поверхностных наноструктур доэвтектического силумина при электронно-пучковой обработке / С. А. Невский // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2019. – Т. 16. – № 2. – С. 154 – 162.
13. Сарычев, В. Д. Построение математической модели износа внутренних поверхностей ковша экскаватора / В. Д. Сарычев, А. Ю. Грановский, С. А. Невский // Горный журнал. – 2019. – № 8. – С. 70 – 73.

14. Невский, С. А. Механизм образования микро- и нанокристаллических поверхностных слоев титановых и алюминиевых сплавов при электронно-пучковой обработке / С. А. Невский // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2020. – Т. 17. – № 10. – С. 385 – 395.
15. Сарычев, В. Д. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца и магнитно-гидродинамическая неустойчивость цилиндрического столба / В. Д. Сарычев, С. А. Невский, М. А. Кузнецов, С. А. Солодский, Д. П. Ильященко, Е. В. Верхотурова // *Прикладная физика*. – 2020. – № 3. – С. 5 – 10.

Публикации в журналах, входящих международные базы цитирования Web of Science и Scopus

1. Невский, С. А. Влияние электрического потенциала поверхности алюминия на релаксацию напряжений / С. А. Невский, С. В. Коновалов, В. Е. Громов // *Журнал технической физики*. – 2011. – Т. 81. – Вып. 6. – С. 133 – 136. (Nevskii, S. A. Effect of the electric potential of the aluminum surface on stress relaxation / S. A. Nevskii, S. V. Konovalov, V. E. Gromov // *Technical Physics*. – 2011. – V. 56. – Issue 6. – P. 877 – 880).
2. Sarychev, V. D. Biphasе filtration model of flow materials at superplastic deformation / V. D. Sarychev, S. A. Nevskii, V. E. Gromov // *Materials Physics and Mechanics*. – 2015. – V. 24. – Issue 2. – P. 119 – 128.
3. Sarychev, V. D. Viscous flow analysis of the Kelvin–Helmholtz instability for short waves / V. D. Sarychev, S. A. Nevskii, E. V. Sarycheva, S. V. Konovalov, V. E. Gromov // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – № 1783. – P. 1 – 4 (020198).
4. Sarychev, V. D. Model of nanostructure formation in rail steel during long term operation / V. D. Sarychev, S. A. Nevskii, S. V. Konovalov, V. E. Gromov // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – № 1783. – P. 1 – 4 (020197).
5. Сарычев, В. Д. Формирование нанослоев за счет развития гидродинамических неустойчивостей при внешних энергетических воздействиях / В. Д. Сарычев, В. Е. Громов, С. А. Невский, А. И. Низовский, С. В. Коновалов // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2016. – Т. 59, № 10. – С. 679 – 687. (Sarychev, V. D. Nanolayer Formation during Hydrodynamic Instability / V. D. Sarychev, V. E. Gromov, S. A. Nevskii, A. I. Nizovskii, S. V. Konovalov // *Steel in Translation*. – 2016. – V. 46. – No. 10. – P. 679 – 685).
6. Konovalov, S. V. Mathematical modeling of the concentrated energy flow effect on metallic materials / S. V. Konovalov, X. Chen, V. D. Sarychev, S. A. Nevskii, V. E. Gromov, M. Trtica // *Metals*. – 2017 – V. 7. – No. 1. – P. 1 – 18.
7. Гагарин, А. Ю. Влияние импульсного электрического тока на характер движения автоволн пластической деформации при растяжении стальной пластины / А. Ю. Гагарин, В. Д. Сарычев, С. А. Невский, А. И. Потекаев // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2019. – Т. 62. – № 2. – С. 148 – 153. (Gagarin, A. Y. Influence of pulsed electric current on the motion of spontaneous plastic-deformation waves in steel-plate extension / A. Y. Gagarin, V. D.

- Sarychev, S. A. Nevskii, A. I. Potekaev // *Steel in Translation*. – 2019. – V. 49. – № 2. – P. 97 – 101).
8. Сарычев, В. Д. Механизм формирования границы раздела покрытие/подложка при обработке проводников плазмой электрического взрыва / В. Д. Сарычев, С. А. Невский, Д. А. Романов, А. Ю. Грановский, А. Д. Филляков, К. В. Соснин // *Деформация и разрушение материалов*. – 2018. – № 11. – С. 2 – 6. (Sarychev, V. D. Mechanism of Formation of the Coating/Substrate Interface during the Treatment of Conductors by an Electric Explosion Plasma / V. D. Sarychev, S. A. Nevskii, D. A. Romanov, A. Y. Granovskii, A. D. Filyakov, K. V. Sosnin // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2019. – Issue 4. – P. 289 – 293)
 9. Sarychev, V. D. Modeling of the initial stages of the formation of heterogeneous plasma flows in the electric explosion of conductors / V. D. Sarychev, S. A. Nevskii, S. V. Konovalov, A. Yu. Granovskii // *Current Applied Physics*. – 2018. – V. 18. – P. 1101 – 1107.
 10. Сарычев, В. Д. Механизм взаимодействия твёрдых и жидких металлов при ультразвуковом воздействии / В. Д. Сарычев, А. И. Низовский, А. А. Новиков, С. А. Невский, М. В. Тренихин, А. Ю. Грановский, В. Е. Громов // *Доклады Академии наук*. – 2018. – Т. 479. – № 3. – С. 262 – 265. (The Interaction Mechanism between Solid and Liquid Metals under Ultrasonic Action / V. D. Sarychev, A. I. Nizovskii, A. A. Novikov, S. A. Nevskii, M. V. Trenikhin, A. Yu. Granovskii, V. E. Gromov // *Doklady Physics*. – 2018. – V. 63. – № 3. – P. 117 – 120.)
 11. Ivanov, Yu. F. Microstructure and properties of hypoeutectic silumin treated by high-current pulsed electron beams / Yu. F. Ivanov, D. V. Zagulyaev, S. A. Nevskii, V. E. Gromov, V. D. Sarychev, A. P. Semin // *Progress in Physics Metals*. – 2019. – V. 20. – № 3. – P. 447 – 484.
 12. Sarychev, V. D. Thermocapillary model of formation of nanostructures on the surface irradiated by low-energy high-current electron beams / V. D. Sarychev, S. A. Nevskii, S. V. Konovalov, A. Yu. Granovskii, V. E. Gromov // *Materials Research Express*. – 2019. – V. 6. – № 7. – P. 076551-1 – P. 076551-8.
 13. Sarychev, V. D. Disintegration mechanism of second phase particles under electron beams / V. D. Sarychev, S. A. Nevskii, S. V. Konovalov, A. Yu. Granovskii, V. E. Gromov // *Materials Research Express*. – 2019. – V. 6. – P. 106556-1. – P. 106556-10.
 14. Sarychev, V. D. Model of nanostructure formation in Al–Si alloy at electron beam treatment / V. D. Sarychev, S. A. Nevskii, S. V. Konovalov, A. Yu. Granovskii, Y. F. Ivanov, V. E. Gromov // *Materials Research Express*. – 2019. – Vol. 6, № 2. – 14 p. (026540).
 15. Nevskii, S. A. Wave instability on the interface coating/substrate material under heterogeneous plasma flows / S. A. Nevskii, V. D. Sarychev, S. V. Konovalov, A. Yu. Granovskii, V. E. Gromov // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – № 9 (1). – P. 539 – 550.
 16. Nevskii, S. A. Formation Mechanism of Micro- and Nanocrystalline Surface

- Layers in Titanium and Aluminum Alloys in Electron Beam Irradiation / S. A. Nevskii, V. D. Sarychev, S. V. Konovalov, A. Yu. Granovskii, V. E. Gromov // *Metals*. – 2020. – V. 10. – Is. 10. – P. 1399-1. – P. 1399-14.
17. Nevskii, S. A. Simulation of phase transformations in high carbon pearlite steel at various cooling rates / S. A. Nevskii, Yu. N. Simonov, V. E. Kormyshev, S. V. Konovalov // *CIS Iron and Steel Review*. – 2020. – № 2. – P. 55 – 60.
 18. Сарычев, В. Д. Модель формирования наноструктурных слоев при длительной эксплуатации рельсов / В. Д. Сарычев, С. А. Невский, В. Е. Кормышев, А. А. Юрьев, В. Е. Громов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2020. – Т. 63. – № 9. – С. 699 – 706. (Sarychev, V. D. Model of Nanostructural Layer Formation during Long-Term Operation of Rails / V. D. Sarychev, S. A. Nevskii, V. E. Kormyshev, A. A. Yur'ev, V. E. Gromov // *Steel in Translation*. – 2020. – V. 50. – № 10. – P. 665 – 671).
 19. Сарычев, В. Д. Моделирование дифференцированной термической обработки железнодорожных рельсов сжатым воздухом / В. Д. Сарычев, С. Г. Молотков, В. Е. Кормышев, С. А. Невский, Е. В. Полевой // *Известия вузов. Черная Металлургия*. – 2020. – Т. 63. – № 11-12. – С. 907 – 914. (Sarychev, V. D. Simulation of Differentiated Thermal Processing of Railway Rails by Compressed Air / V. D. Sarychev, S. G. Molotkov, V. E. Kormyshev, S. A. Nevskii, E. V. Polevoi // *Steel in Translation*. – 2020. – V. 50. – Issue 12. – P. 848 – 854)
 20. Nevskii, S. A. The mechanism of formation of surface micro- and nanostructures in the AlCoCrFeNi high-entropy alloy during electron-beam treatment / S. A. Nevskii, S. V. Konovalov, K. A. Osintsev, Yu. F. Ivanov, A. Y. Granovskii, V. E. Gromov // *Letters on Materials*. – 2021. – Vol. 11, № 3. – P. 309 – 314.

Монографии

1. Сарычев, В. Д. Математические модели и механизмы формирования градиентных структур в материалах при внешних энергетических воздействиях: монография / В. Д. Сарычев, С. А. Невский, А. Ю. Грановский, В. Е. Громов ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. – 320 с.
2. Сарычев, В. Д. Математические модели формирования градиентных структур в материалах при воздействии концентрированных потоков энергии / В. Д. Сарычев, С. А. Невский, А. Ю. Грановский, В. Е. Громов ; Министерство науки и высшего образования РФ, Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2019. – 120 с.
3. Громов, В. Е. Структура и упрочнение силумина, модифицированного электронно-ионной плазмой : монография / В. Е. Громов, Д. В. Загуляев, Ю. Ф. Иванов, С. В. Коновалов, С. А. Невский, В. Д. Сарычев, Е. А. Будовских, Ю. А. Рубанникова. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2020. – 287 с.

1. Невский, С. А. Влияние электрического потенциала на процесс перестройки дислокационных субструктур алюминия : сб. науч. тр. / С. А. Невский, С. В. Коновалов, В. Е. Громов // Материалы 51-й Международной конференции «Актуальные проблемы прочности». – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2011. – С. 63.
2. Невский, С. А. Релаксация механических напряжений в условиях слабых электрических воздействий : сб. науч. тр. / С. А. Невский, С. В. Коновалов, В. И. Мясникова // Материалы XVII Международной конференции «Современная техника и технологии». – Томск: ТПУ, 2011. – С. 120–123.
3. Математическая модель электронно-пучковой обработки силуминов / В. Д. Сарычев, С. А. Невский, К. В. Алсараева, С. В. Коновалов, В. Е. Громов // Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов – ДСМСМС-2014 : сборник тезисов докладов XIII Международной конференции, 7–11 сентября 2014 г. – Екатеринбург : ИФМ, 2014. – С. 186–187.
4. Sarychev, V. D. Model of Plasticity by Heterogeneous Media / V. D. Sarychev, S. A. Nevskii, E. V. Cheremushkina, V. E. Gromov // Recent Advances in Mechanical Engineering and Mechanics : proceedings of the 2014 International Conference on Theoretical Mechanics and Applied Mechanics (TMAM '14) ; proceedings of the 2014 International Conference on Mechanical Engineering (ME '14), March 15-17, 2014. – Venice, Italy, 2014. – P. 131–133.
5. Сарычев, В. Д. Термоупругая модель взаимодействия электронных пучков на материал / В. Д. Сарычев, С. А. Невский, С. В. Коновалов, К. В. Алсараева, В. Е. Громов // Перспективные материалы и технологии : сборник материалов международного симпозиума, 27-29 мая 2015 г. – Витебск, 2015. – С. 102–104.
6. Сарычев, В. Д. Гидродинамическая модель образования наноструктур в рельсовой стали в процессе изнашивания / В. Д. Сарычев, С. А. Невский, С. В. Коновалов, А. Ю. Грановский, В. Е. Громов // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов : сборник материалов VI Международной конференции, 10-13 ноября 2015 г. – Москва: ИМЕТ РАН, 2015. – С. 897–899.
7. Сарычев, В. Д. Механизм образования наноструктур в материалах при интенсивной пластической деформации / В. Д. Сарычев, С. А. Невский, С. В. Коновалов, В. Е. Громов // Актуальные проблемы прочности : сборник тезисов LVIII Международной конференции, 10-19 мая 2017 г. – Пермь, 2017. – С. 69.
8. Сарычев, В. Д. Математическая модель износа внутренних поверхностей ковша экскаватора / В. Д. Сарычев, А. Ю. Грановский, С. А. Невский, В. Е. Громов // Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов : тезисы докладов седьмой международной конференции, Москва, 2-5 октября 2017 г. – Москва, 2017. – С. 180.
9. Сарычев, В. Д. Механизм формирования наноструктур в поверхностных слоях материалов при воздействии электронных пучков / В. Д. Сарычев, С. А. Невский, А. Ю. Грановский, В. Е. Громов // XXIII Петербургские чтения по

проблемам прочности, посвященные 100-летию ФТИ им. А.Ф. Иоффе и 110 со дня рождения чл.-кор. АН СССР А.В. Степанова : сборник материалов, 10-12 апреля 2018 г. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 315-316.

10. Невский, С. А. Фильтрационная модель пластичности при воздействии электростатических полей / С. А. Невский, В. Д. Сарычев, Е. А. Высоцкая, В. Е. Громов // Фазовые превращения и прочность кристаллов : тезисы X Международной конференции ФППК-2018, 29 октября-2 ноября 2018 г. – Черноголовка, 2018. – С. 142.

11. Грановский, А. Ю. Моделирование формирования микро- и наноструктурных состояний поверхности металлов и сплавов при воздействии концентрированных потоков энергии / А. Ю. Грановский, С. А. Невский, В. Д. Сарычев, Д. Л. Мелехов, В. Е. Громов // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов : сборник материалов VIII Международной конференции, 19-22 ноября 2019 г. – Москва : ИМЕТ РАН, 2019. – С. 741.

12. Механизм образования наноструктур в поверхностных слоях бинарных сплавов при электронно-пучковой обработке / В. Д. Сарычев, С. А. Невский, А. Ю. Грановский, Д. А. Сухенко, В. Е. Громов // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии : тезисы докладов Международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения основателя и первого директора ИФПМ СО РАН академика Виктора Евгеньевича Панина, Томск, 5-9 октября 2020 г. – Томск : ТГУ, 2020. – С. 175.

13. Сарычев, В. Д. Гидродинамическая модель образования наноструктур при электронно-пучковой обработке / С. А. Невский, В. Д. Сарычев, А. Ю. Грановский, Д. Л. Мелехов, С. А. Мандрыгин, В. Е. Громов // Фазовые превращения и прочность кристаллов : сборник тезисов XI Международной конференции, Черноголовка, 26-30 октября 2020 г. – Черноголовка, 2020. – С. 131.

14. Кормышев, В. Е. Механизмы формирования наноразмерных структурно-фазовых состояний рельсовой стали при дифференцированной термической обработке / В. Е. Кормышев, В. Д. Сарычев, С. А. Невский, Ю. А. Рубанникова, В. Е. Громов // Сборник трудов тринадцатого ежегодного заседания Научного Совета РАН по физике конденсированных сред и научно-практического семинара «Актуальные проблемы физики конденсированных сред», 23-26 ноября 2020 г. – Черноголовка, 2020. – С. 106.

Патент на изобретение

1. Пат. 2554251 Российская Федерация, МПК C22F 3/02. G05D 11/00. Способ обработки изделий из алюминия марки А85, работающих в условиях релаксации напряжений / Невский С. А., Коновалов С. В., Фефилова А. А., Громов В. Е.; правообладатель Сиб. гос. индустр. ун-т - №2013154448; заявл. 06.12.13 ; опубл.27.06.15, Бюл. № 18. -5 с.

Подписано в печать «__»._____2022.
Формат бумаги 60х84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 2,44. Уч. изд. л. 2,73. Тираж 120 экз. Заказ № _____.
Сибирский государственный индустриальный университет.
654007, г. Новокузнецк, Кемеровская область – Кузбасс, ул. Кирова, 42
Издательский центр СибГИУ