

На правах рукописи



Грановский Алексей Юрьевич

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРО- И
НАНОСТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ И
СПЛАВОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ
ЭНЕРГИИ**

Специальность

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новокузнецк – 2019

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

Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор
Громов Виктор Евгеньевич

Официальные оппоненты: Клименов Василий Александрович – доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», руководитель отделения материаловедения инженерной школы новых производственных технологий

Демьянов Борис Федорович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Физика», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина»

Защита состоится «21» мая 2019 г. в 10⁰⁰ ч. на заседании диссертационного совета Д 212.252.04 при Сибирском государственном индустриальном университете по адресу: 654007, г. Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, д. 42.
Факс: (8-3843) 46-57-92, E-mail: d_212_252_04@sibsiu.ru.

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

Автореферат разослан «__» марта 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор химических наук,
профессор



Горюшкин В.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время активно разрабатываются и исследуются технологии обработки металлов с помощью концентрированных потоков энергии, под которыми понимаются такие внешние воздействия как: гетерогенные плазменные потоки продуктов электрического взрыва проводников, электронно-пучковая обработка, наплавка, электрическая сварка. Как известно, химический состав и структура металлов и сплавов определяют эксплуатационные свойства изделий. Поэтому выявление механизмов формирования структур при воздействии концентрированных потоков энергии является важной научно-практической задачей для материаловедения. Градиентные структуры, образованные при воздействии концентрированных потоков энергии на металлы и сплавы, обладают высокими физико-механическими свойствами. При этом физическая природа формирования микро и наноструктурных состояний в металлах до конца не исследована и является одной из важнейших научных проблем физики конденсированного состояния.

Степень разработанности темы. Согласно экспериментальным данным, воздействие гетерогенных плазменных потоков на материалы приводит к формированию градиентной структуры, содержащей два нанослоя: поверхностный и внутренний, расположенный на границе расплавленного слоя. Механизм формирования поверхностного нанослоя основан на развитии в наноразмерном диапазоне длин волн неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (НКГ), которая реализуется при натекании плазменного потока со скоростями порядка несколько километров в секунду. Высказана гипотеза о том, что внутренний нанослой формируется так же основе развития НКГ в наноразмерном диапазоне длин волн. Однако до настоящего исследования анализ дисперсионного уравнения в области параметров, при котором реализуется второй нанослой, не был проведен. Для анализа первоначального сложного дисперсионного уравнения используется подход, упрощающий вид этого уравнения, – вязко-потенциальная модель.

Тема диссертации соответствует критической технологии РФ «Технологии получения и обработки конструкционных наноматериалов» и приоритетному направлению науки, технологий и техники в РФ «Индустрия наносистем». Настоящая работа выполнялась при поддержке грантов Российского научного фонда (проекты 15-19-00065, № 15-12-00010), Российского фонда фундаментальных исследований (№ 15-08-03411а, № 16-43-700659 р_а и № 16-48-420530 р_а) и государственного задания Минобрнауки № 3.1283.2017/4.6.

Целью работы является установление условий и физической природы формирования микро- и наноструктурных состояний при поверхностном модифицировании металлов и сплавов концентрированными потоками энергии.

Реализация данной цели потребовала решения следующих задач:

1. Установить механизм формирования микро- и наноразмерных состояний металлов и сплавов при возникновении гидродинамических неустойчивостей в расплавленных поверхностных слоях.
2. Выявить область параметров, при которых реализуются микро- и наноструктурные состояния в металлах и сплавах при воздействии на их поверхность гетерогенных плазменных потоков и электронных пучков.
3. Исследовать с использованием математического моделирования тепло-гидродинамические процессы на различных структурных уровнях при сварке и наплавке и научно обосновать роль неустойчивостей в формировании микро- и наноразмерных состояний металлов и сплавов.
4. Разработать рекомендации по практическому внедрению результатов исследований условий формирования микро- и наноразмерных состояний, выбору режимов наплавки, плазменного упрочнения и электронно-пучковой обработки металлов и сплавов.

Научная новизна. Научно обоснована физическая природа формирования наноструктурных слоев в металлах и сплавах при воздействии на поверхность концентрированных потоков энергии, заключающаяся в возникновении и развитии гидродинамических неустойчивостей. При численном решении дисперсионного уравнения для неустойчивости Кельвина-Гельмгольца вязкой жидкости получены зависимости инкремента от длины волны с двумя максимумами, что соответствует появлению микро- и наноразмерных состояний, возникающих при воздействии гетерогенных плазменных потоков.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов обусловлена корректностью постановки задач исследования, комплексным подходом к их решению с использованием современных численных и аналитических методов, соответствием полученных закономерностей экспериментальным данным других авторов.

Научная и практическая значимость работы. Установлены механизмы формирования микро- и нанокристаллических структур в металлах и сплавах при воздействии концентрированных потоков энергии. Предложены механизмы, разработаны математические модели и проведены численные эксперименты процессов, протекающих при воздействии концентрированных потоков энергии, позволяющие определять параметры, при которых формируется характерный размер градиентных структур. Полученные при выполнении работы результаты используются для разработки новых и совершенствования существующих режимов наплавки и плазменного упрочнения изделий, работающих в условиях тяжелых нагрузок. Результаты диссертации могут найти применение при создании опытных и промышленных установок, использующих гетерогенные плазменные потоки и электронные пучки, для микролегирования металлов и сплавов. Результаты диссертации используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» при подготовке бакалавров и магистрантов по направлениям 22.03.01 и 22.04.01 «Материаловедение и технология материалов». Практическая значимость подтверждена актами использования результатов.

Личный вклад автора заключается в разработке научно обоснованных механизмов процессов, протекающих в металлах и сплавах при воздействии концентрированных потоков энергии, проведении численных экспериментов, в анализе результатов экспериментов и в сопоставлении их с расчетными данными, написании статей и тезисов докладов, формулировании основных выводов.

Методология и методы исследования основаны на понятиях и законах «Физики сплошных сред». Используются аналитические и численные методы моделирования гидродинамических течений, температурных и электродинамических полей в процессах, протекающих при воздействии концентрированных потоков энергии. Разработка и численный расчет конечно-элементных моделей производились в комплексе программ COMSOL Multiphysics 5.1.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Диапазон параметров электровзрывного легирования, при которых формируется внутренний нанослой при воздействии гетерогенных плазменных потоков.
2. Область параметров электровзрывного напыления, при которых происходит развитие неустойчивости Релея-Тейлора границы раздела в расплавах при воздействии гетерогенных плазменных потоков.
3. Область параметров воздействия и свойств материала, при которых формируются микро- и наноструктурные состояния в металлах и сплавах при воздействии электронных пучков на основе развития термокапиллярной неустойчивости.
4. Механизмы, расчетные модули процессов и результаты численных экспериментов формирования градиентных структур при электродуговой наплавке, используемые при выборе практических режимов обработки металлов и сплавов.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, 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 материалов 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»).

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на **Апробация работы.** Результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях, чтениях, семинарах и школах:

10-ая Всероссийская научная конференция «Краевые задачи и математическое моделирование», Новокузнецк, 2010; V Всероссийская конференция с участием зарубежными учеными «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения», Бийск, Россия, 2014; «Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures», Томск,

2015; «International Scientific Conference on Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials 2015, RTER», Томск, 2015»; III Российско-Казахстанская молодежная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии», Барнаул, 2015; XXIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов, Пермь, 2015; «Advanced Materials in Technology and Construction», Томск, 2016; XXIII Уральская школа металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» Тольятти, 2016; «XII International Conference Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials», Томск, 2017; «Ecology and Safety in the Technosphere: Current Problems and Solutions», Юрга, 2017; Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения», Новокузнецк, 2017; LVIII Международная конференция "Актуальные проблемы прочности", Пермь, 2017; XI Всероссийская конференция молодых ученых "Проблемы механики: теория и новые технологии", Новосибирск - Шерегеш, 2017; LIX Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» Тольятти, 2017; VII Международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов», Москва, 2017; VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», Москва, 2017; Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», Томск, 2018.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 23 работах, в том числе в 8 статьях в журналах, входящих в Перечень, рекомендованный ВАК для публикации результатов диссертационных исследований, 5-ти главах в коллективных монографиях, остальные - в трудах всероссийских и международных конференций и других научных мероприятий.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация включает в себя введение, 5 глав, основные выводы, список литературы из 176 наименований, приложение, изложена на 131 странице машинописного текста, содержит 46 рисунков, 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, перечислены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** «Современное состояние исследований микро- и наноструктурных состояний в металлах и сплавах», являющейся обзорной, проведен подробный анализ литературных данных отечественных и зарубежных авторов об исследовании природы свойств металлов и сплавов на разных масштабных уровнях при воздействии концентрированных потоков энергии. Проведено сопоставление теоретических и экспериментальных результатов работ по формированию нано- и микроструктур при воздействии гетерогенных плазменных потоков на металлы и сплавы. Выполнен анализ работ по исследованию гидродинамических неустойчивостей, возникающих в металлах и сплавах при воздействии концентрированных потоков энергии.

Проанализированы работы по моделированию сварочных и наплавочных процессов. На основе анализа обоснованы цели и задачи настоящего исследования.

Во второй главе «Исследование гидродинамических неустойчивостей в металлах и сплавах при воздействии гетерогенных плазменных потоков» отмечено, что основным механизмом возникновения микро- и наноструктур в металлах и сплавах, при воздействии гетерогенных плазменных потоков (ГПП) продуктов взрыва проводников, является развитие гидродинамических неустойчивостей (рисунок 1). При формировании ГПП возникает магнитогидродинамическая ситуация, включающая формирование двух зон: центральной – под электродом, и зоны истечения. Вначале на мишень действует высокоскоростной поток, который расплавляет мишень, а затем с расплавом мишени начинает взаимодействовать гетерогенный поток продуктов электрического взрыва фольги. В итоге получается покрытие из продуктов взрыва.

Получена математическая модель течения конечных слоев вязкой и идеальной жидкости, включающая в себя уравнения Навье-Стокса и динамические и кинематические граничные условия. На основе линейного анализа данной математической модели было впервые получено дисперсионное уравнение, которое связывает параметры неустойчивости с параметрами внешнего воздействия и физическими характеристиками материала:

$$G(z, d, \nu, \nu_1) + \mu \Omega_1^2 \operatorname{cth}(kH) + W = 0,$$

$$\Omega_1 = \frac{\Omega}{k^2} = \nu(z^2 - 1)i - \frac{u_0}{k}, \mu = \frac{\rho_2}{\rho_1}, W = \frac{A}{\rho_1 k^3} = \frac{g(\rho_2 - \rho_1) - \sigma_0 k^2}{\rho_1 k^3}, \quad (1)$$

$$z = \frac{k_1}{k}, k_1^2 = k^2 - i\omega / \nu,$$

где ω – комплексная частота; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; u_0 – скорость натекающего потока; h, H – толщины слоев; ρ_1, ρ_2 – плотности слоев; ν, ν_1 – объемная и граничная кинематическая вязкость; σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения; g – ускорение слоев по оси y .

При $\nu = 0, \nu_1 \neq 0$ предельным переходом из (1) получается дисперсионное уравнение для вязко-потенциальной жидкости, где вязкость ν_1 учитывается только на границе:

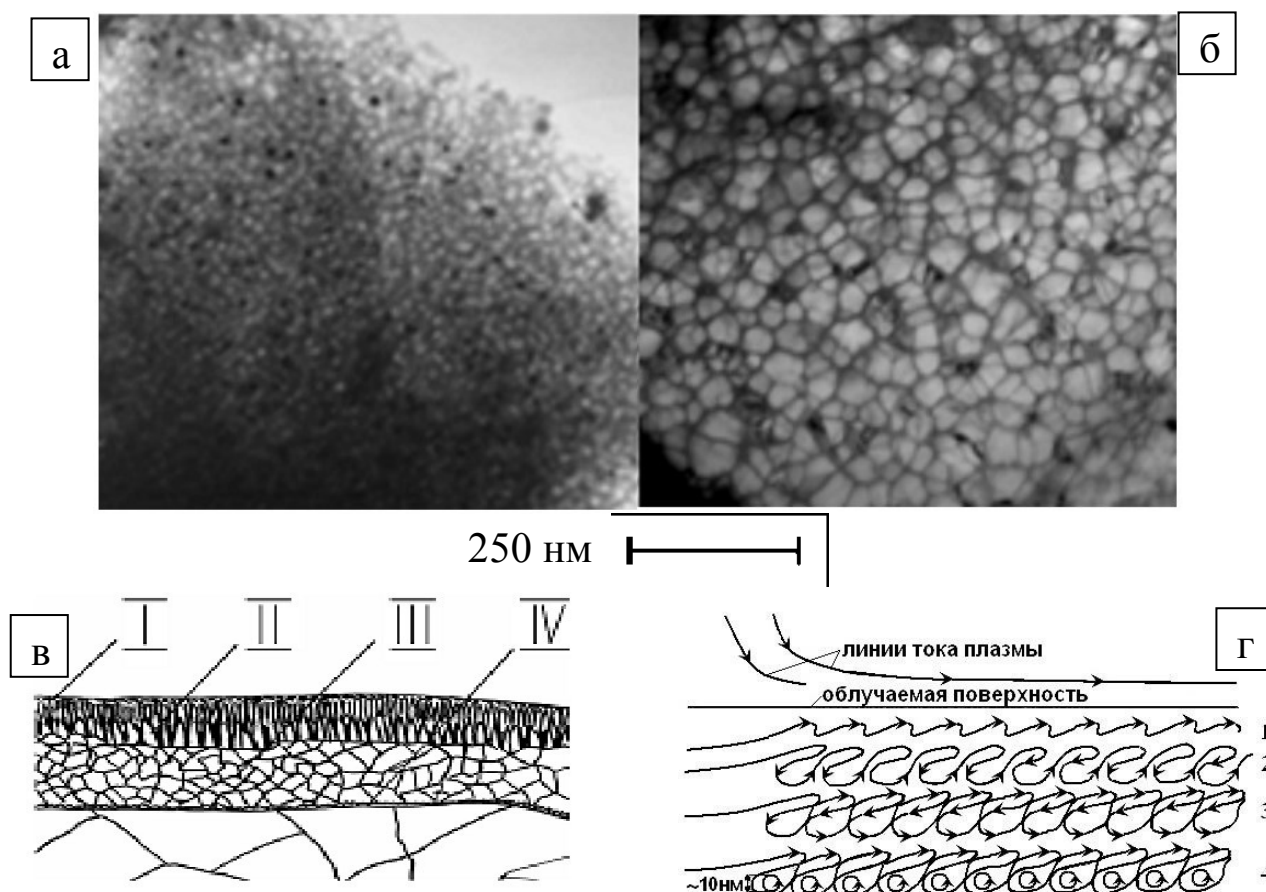
$$a\omega^2 + 2b\omega + c = 0,$$

$$a = A_R = \operatorname{cth}(kh)\rho_1 + \operatorname{cth}(kH)\rho_2,$$

$$b = -B_R + iB_I, B_R = u_0 k \operatorname{cth}(kH)\rho_2, B_I = k^2(\rho_1 \nu_1 \operatorname{cth}(kh)), \quad (2)$$

$$c = C_R = u_0^2 k^2 \operatorname{cth}(kH)\rho_2 + kA,$$

$$A = g(\rho_2 - \rho_1) - \sigma_0 k^2.$$



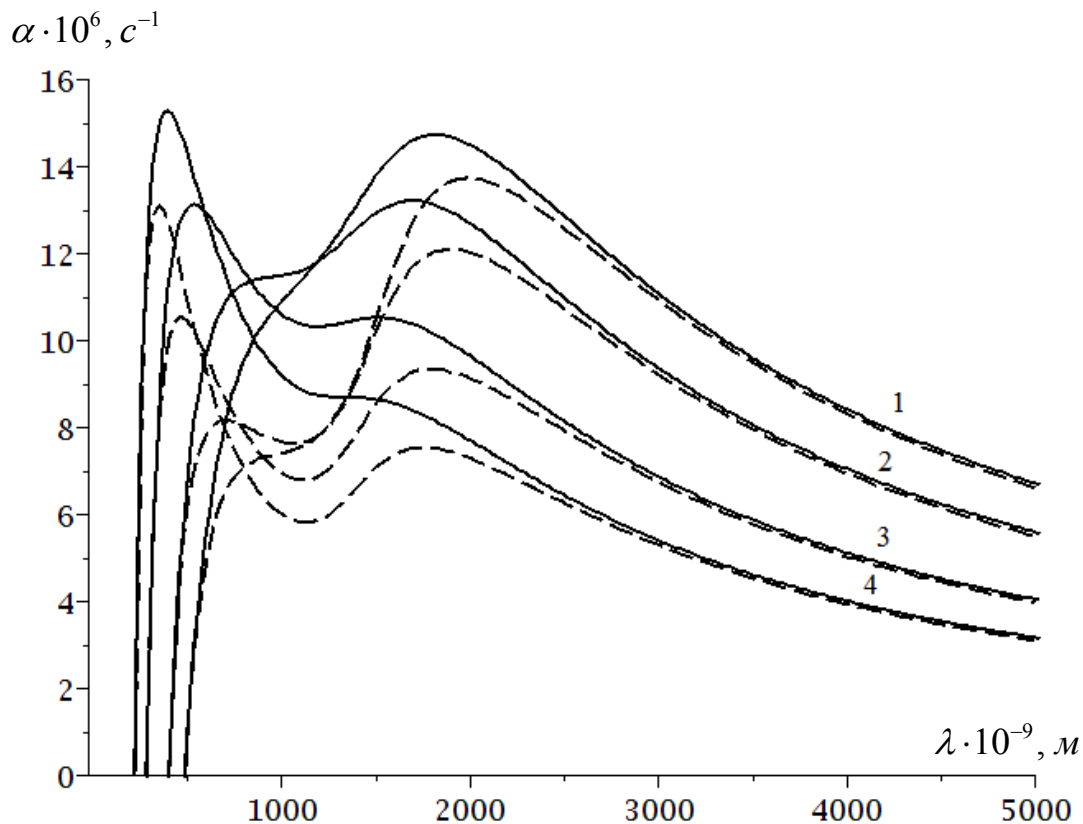
а – структура приповерхностного слоя меднения никеля;
 б – структура приповерхностного слоя борирования никеля;
 в – схема структуры поверхностного слоя;
 г – схема развития неустойчивости
 Рисунок 1 – Неустойчивость при ЭВЛ

Параметрический анализ уравнений (1) и (2) показал, что зависимости инкремента от длины волны для вязкой и вязко-потенциальной жидкости практически одинаковые в широком диапазоне параметров (рисунок 2). Этот факт позволяет использовать дисперсионное уравнение вязко-потенциальной жидкости для качественного анализа неустойчивости Кельвина-Гельмгольца границы раздела между идеальной и вязкой жидкостью.

Численные расчеты зависимости инкремента от длины волны при определенных значениях параметров, соответствующих образованию внутренних нанослоев при воздействии гетерогенных плазменных потоков на железо, показали, что в случае тонкого движущегося слоя в зависимости инкремента от длины волны наблюдается два максимума (рисунок 2): в микро- и нанодиапазоне. Это соответствует развитию двухмодовой неустойчивости. Микроволновая мода соответствует взаимодействию слоев идеальной жидкости. Нановолновая мода образуется благодаря вязкости.

При воздействии сформированного электрическим взрывом молибденовой фольги гетерогенного плазменного потока, направленного на подложку из меди, обнаружены режимы, при которых возможны образования слоевых и

наполненных структур. На основе представлений о развитии неустойчивости Релея-Тейлора была получена модель, описывающая условия возникновения и характерные размеры структур на облучаемой ГПП поверхности.



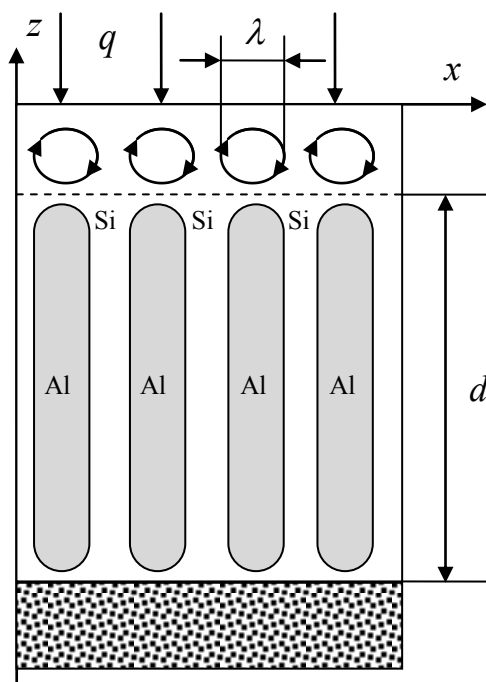
Сплошная линия – вязкая модель, штрих пунктирная – вязко-потенциальная.

1 – $H = 6$ нм; 2 – $H = 10$ нм; 3 – $H = 20$ нм; 4 – $H = 30$ нм

Рисунок 2 – Зависимости инкремента α от длины волны λ при вариации толщины верхнего слоя H и поверхностном натяжении $\sigma_0 = 1,2 \text{ Н/м}$

Таким образом, полученные модели позволяют связать технологические параметры установок ГПП и размеры полученных градиентных структур на поверхности обрабатываемого металла или сплава.

В третьей главе «Исследование термокапиллярной неустойчивости в металлах и сплавах при электронно-пучковой обработке»: представлено теоретическое исследование формирования градиентных структур в образцах силумина при обработке электронными пучками (ЭПО) разной мощности. При воздействии ЭПО на силумин на поверхности образца образуется ячеистая структура с диаметром ячеек 600 нм. По глубине образца до 70 мкм формируются столбчатые структуры и ниже зоны оплавления происходит дробление пластин кремния с образованием мелких частиц. Предложен механизм, основанный на развитии термокапиллярной неустойчивости на облучаемой поверхности, схема которого представлена на рисунке 3.



q – тепловой поток от электронного пучка; d – толщина слоя столбчатой кристаллизации; λ – размер вихревой структуры

Рисунок 3 – Схема процесса воздействия ЭПО на силумины

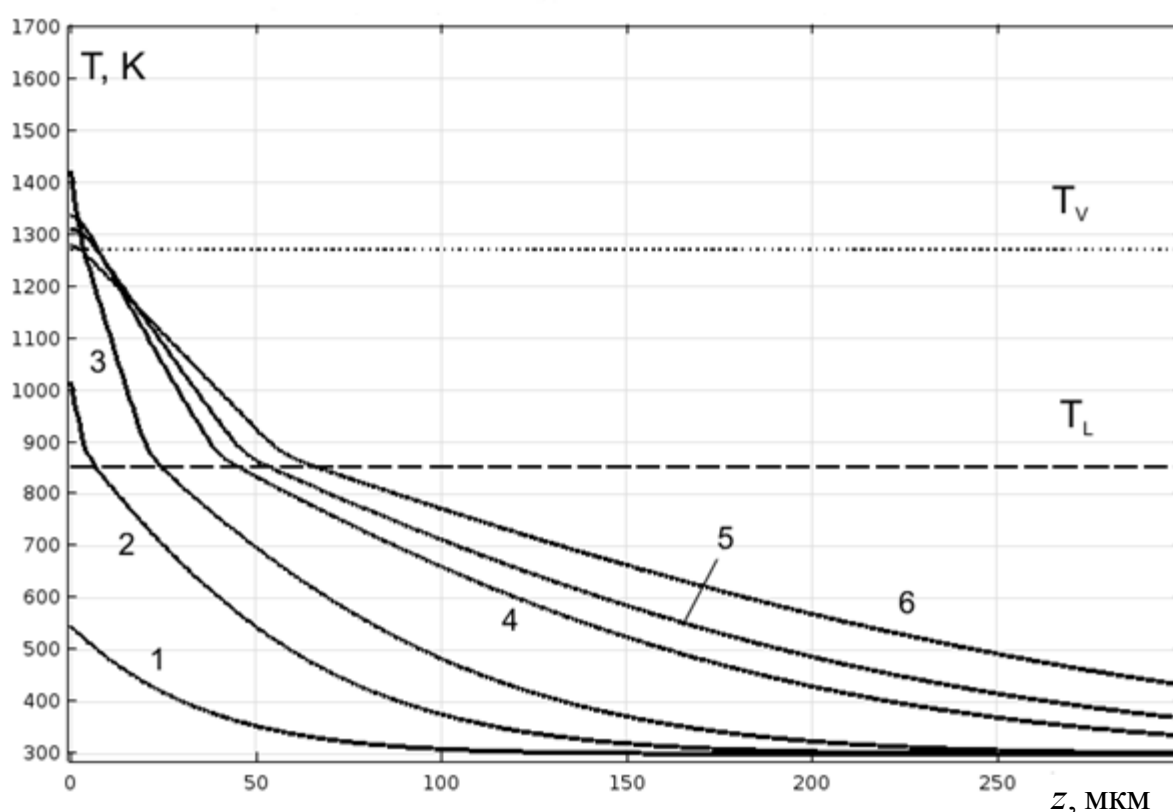
Воздействие ЭПО на силумин задается тепловым потоком q на поверхности. Начальное возмущение поверхности приводит к неравномерному тепловому потоку и развитию термокапиллярной неустойчивости с длиной волны λ , что приводит к столбчатой кристаллизации по глубине проплавления d . Для определения глубины проплавления d была составлена тепловая модель, в которой теплофизические параметры силумина выбирались при давлении $2 \cdot 10^{-2}$ Па. При таком давлении температура, требуемая для испарения, уменьшается до $1,28 \cdot 10^3$ К для силумина. На рисунке 4 представлены графики распределения температуры по глубине в силумине при воздействии электронным пучком с плотностью энергии 35 Дж/см^2 и длительностью импульса 150 мкс. Видно, что в момент времени $t = 150$ мкс (окончание действия импульса) на поверхности материала $T = 1400$ К (кривая 3), что превышает температуру испарения. Это обусловлено высокой теплопроводностью и удельной теплотой испарения силумина. После окончания действия импульса начинаются процессы охлаждения и кристаллизации.

Была рассчитана глубина проплавления d при воздействии импульсов с различной плотностью энергии E_s (Таблица 1). Полученные расчеты глубины проплавления, представленные в таблице, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Для определения зависимости размеров градиентных структур от параметров воздействия и физических характеристик силумина было получено дисперсионное уравнение для термокапиллярной неустойчивости.

Таблица 1 – Зависимость толщины расплавленного слоя образцов алюминия и силумина

E_s , Дж/см ²	Силумин d , мкм	Алюминий d , мкм	Экспериментальные данные d , мкм
15	23	18	23
20	39	39	30
25	54	57	55
35	80	-	80



T_L – температура плавления силумина; T_v – температура испарения силумина

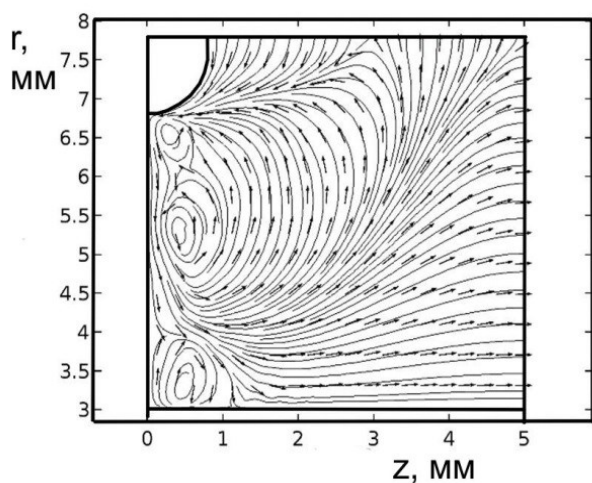
Рисунок 4 – Распределение температуры в силумине по глубине при воздействии электронным пучком с плотностью энергии $E_s = 35$ Дж/см² в различные моменты времени (1 – 50 мкс; 2 – 100 мкс; 3 – 150 мкс; 4 – 300 мкс; 5 – 400 мкс; 6 – 600 мкс)

Анализ дисперсионного уравнения показал, что максимум инкремента длины волны $\lambda_{\max} \approx 600$ нм и соответствует диаметру поверхностных ячеек в экспериментах. Что позволяет использовать полученную модель для определения технологических параметров для ЭПО на силумин.

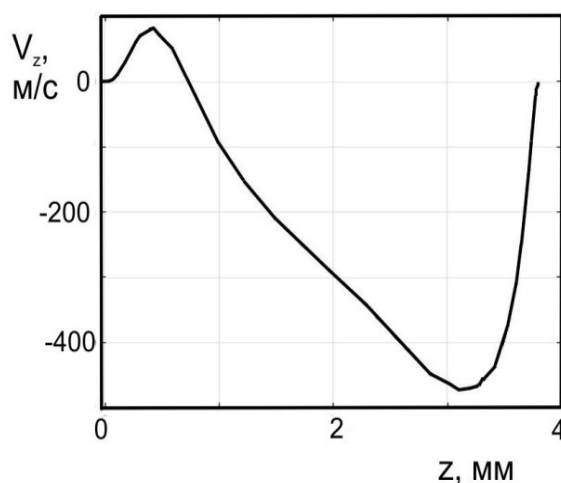
В четвертой главе «Исследование тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов, протекающих при сварке и наплавке» приводится теоретическое исследование процессов сварки и наплавки с целью определения технологических характеристик процесса: глубины ванны расплава и размеров капель расплава в момент отрыва от электрода.

Процесс наплавки является комплексным и состоит из трех основных компонентов: течение в плазменной дуге, формирование и отрыв капли расплава и течение в ванне. Каждый процесс был описан математической моделью и смоделирован в программном пакете COMSOL Multiphysics, который использует метод конечных элементов для решения краевых задач.

Для моделирования течения плазмы и распределения температур в ней используется модель основанная на численном решении уравнения Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости, уравнения теплопроводности и уравнения Максвелла. На границе плазма/анод тепловой поток для анода задается суммой нагрева от плазмы, нагрева от конденсации электронов $\int \vec{j} \cdot \vec{r}_a$ (где ϕ_a работа выхода электронов анода) и радиационных потерь $\varepsilon \sigma_B T^4$ (где ε – излучательная способность анода; σ_B – константа Стефана-Больцмана). На границе плазма/катод вклад в тепловой поток вносят нагрев от плазмы, ионный нагрев $j_i V_i$, радиационные потери $\varepsilon \sigma_B T^4$ и термоионное охлаждение $j_e \phi_c$ (энергия, необходимая для эмиссии электронов с катода, которая задается произведением плотности тока электронов и работы выхода материала катода). Результаты расчета поля скоростей в плазме при силе тока $I = 100$ А показаны на рисунке 5.



(а)



(б)

а – линии тока в момент $t = 1,1$ мкс;

б – v_z на оси симметрии GE в момент $t = 8$ мс

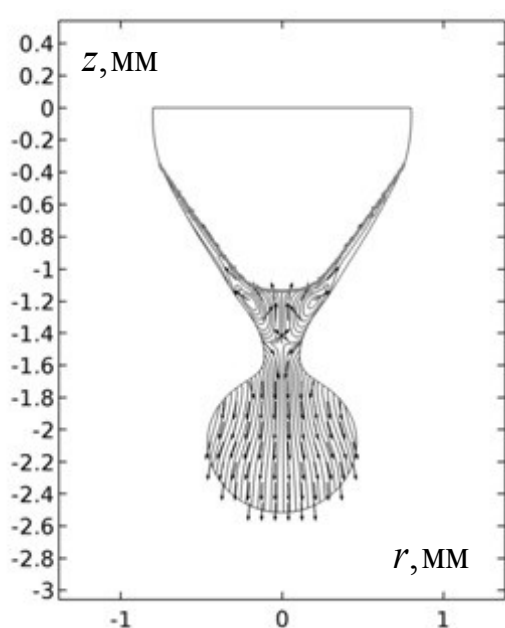
Рисунок 5 – Поле скоростей плазмы в дуге

В начальные моменты времени до 1 мкс течение в плазменной струе нестационарное от катода к аноду распространяется температурная волна и в области течения формируются три вихревые зоны (рисунок 5, а). Образование

первого вихря вблизи катода и его существование 1 мкс создает благоприятную ситуацию для формирования мелких частиц из расплавленного материала порядка 100 нм. Вихревая зона вблизи анода создает противоток плазмы, который не позволяет мелким частицам достичь поверхности анода и участвовать в формировании покрытия.

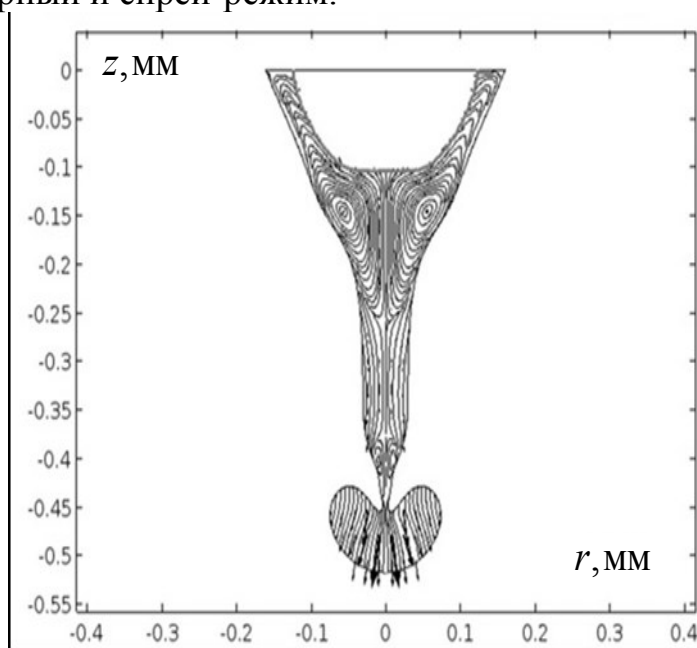
Для описания формирования капли на электроде используется аналогичная модель течения вязкой несжимаемой теплопроводящей жидкости в электромагнитном поле с соответствующими граничными условиями: на свободной границе электрода задается полный ток и тепловой поток от плазменной дуги.

В пакете COMSOL Multiphysics проведены расчеты полей скоростей, температуры, тока и конфигурации капли расплава (рисунок 6). Выявлены два режима формирования капель: глобулярный и спрей-режим.



а – режим 1 – глобулярный режим:

$$I_0 = 150 \text{ A}, \quad U_0 = 22 \text{ В}, \quad R_e = 0,6 \text{ мм}$$



б – режим 2 – спрей-режим:

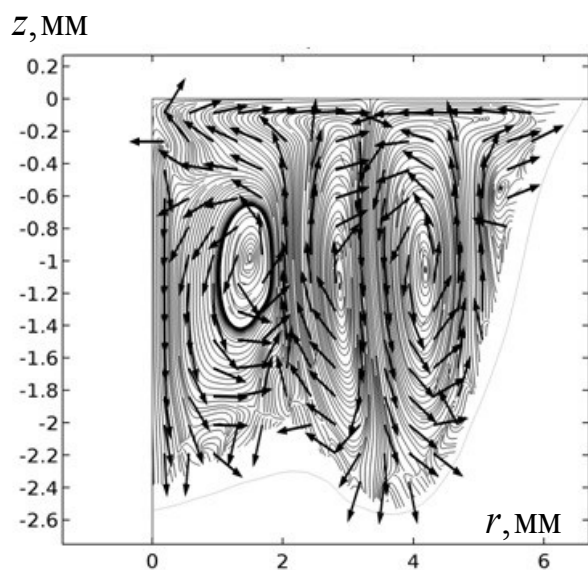
$$I_0 = 300 \text{ A}, \quad U_0 = 22 \text{ В}, \quad R_e = 0,32 \text{ мм}$$

Рисунок 6 – Формирование капли расплава при разных режимах

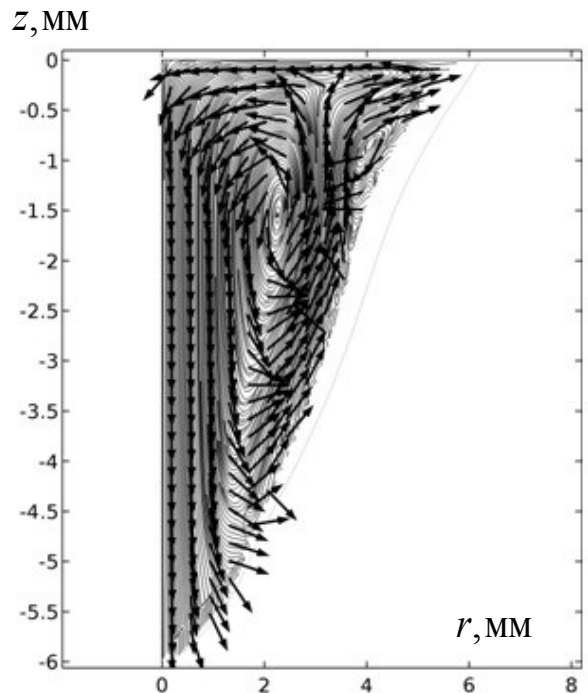
Для случая спрей-режима была получена модель развития неустойчивости тонкой струи расплава с образованием микрокапель.

Для исследования процессов тепло- и массопереноса при воздействии плазменной дуги на ванну расплава при наличии в ее составе поверхностно-активных веществ была построена математическая модель. В этом случае коэффициент поверхностного натяжения зависит от температуры, что приводит к термокапиллярному перемешиванию. Результаты расчетов течения в ванне расплава в различные моменты времени представлены на рисунке 7.

Данная модель позволяет находить важный технологический параметр: глубину ванны расплава, для различных режимов наплавки и различных обрабатываемых металлов.



$t = 4 \text{ с}$



$t = 5,3 \text{ с}$

Рисунок 7 – Течение в сварочной ванне

В пятой главе «Апробация результатов работы»: обосновывается важность полученных результатов для технологий упрочнения. По результатам проведенных исследований неустойчивости Кельвина-Гельмгольца подчеркивается фундаментальная роль вязкости в возникновении неустойчивости в наноразмерном диапазоне длин волн. Приводится описание использования результатов диссертационной работы в промышленности, научной деятельности и учебном процессе.

В приложении приведены справки и акты использования результатов работы в промышленности, научно-исследовательской работе и учебном процессе.

ОСНОВНЫЕ ВЫВООДЫ

В результате проведенного теоретического исследования выявлены механизмы и определены области параметров формирования микро- и наноструктурных состояний в металлах и сплавах при воздействии концентрированных потоков энергии. Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Проведен теоретический анализ формирования наноструктур при обработке металлов и сплавов концентрированными потоками энергии, включающий решение уравнений гидродинамики вязкой и идеальной жидкостей с учетом кинематических и динамических граничных условий. Получено дисперсионное уравнение для возмущений на границе раздела слоев идеальной и вязкой жидкости. Впервые показано, что неустойчивость

Кельвина-Гельмгольца возникает как в микро-, так и в нанодиапазоне длин волн.

2. На основе теоретического анализа перемешивания материалов при нанесении покрытия гетерогенным плазменным потоком, с учетом возникновения неустойчивости Рэлея-Тейлора, дано объяснение особенностей морфологии границы радела молибден – медь.
3. Предложен механизм образования поверхностных периодических структур в силумине при воздействии электронно-пучковой обработки, который заключается в том, что из-за наличия градиента температур на поверхности сплава возникает термокапиллярная неустойчивость. Выполнено теоретическое исследование развития термокапиллярной неустойчивости и выявлены тепловые условия, обеспечивающие столбчатый характер градиентной структуры при воздействии электронно-пучковой обработки на силумин.
4. Проведен численный расчет условий формирования поверхностных периодических структур на основе термокапиллярной неустойчивости, включающий в себя уравнения гидродинамики вязкой жидкости, конвективной теплопроводности и кинематические и динамические граничные условия на поверхности расплава. Численное решение уравнений с учетом кривизны поверхности показало, что в момент окончания действия импульса в расплавленном слое материала начинает формироваться многовихревая структура.
5. Проведен теоретический анализ течения в системе «электрод - плазменная струя – подложка», образования и отрыва капель при различных значениях тока. Показано, что в начальные моменты времени ($t < 1$ мкс) в плазменной струе образуются три вихревые зоны. Выявлены параметры при которых осуществляются глобулярный и спрей-режим формирования капель. Картина конвективного течения расплава в подложке и ее глубина определяются зависимостью коэффициента поверхностного натяжения от концентрации легирующих элементов.
6. На основе обобщения и анализа результатов исследований условий и физической природы формирования микро- и наноструктурных состояний в металлах и сплавах при воздействии концентрированных потоков энергии даны рекомендации по определению режимов электродуговой наплавки и плазменному упрочнению крупногабаритных изделий на предприятиях Кемеровской области с суммарным экономическим эффектом 1,6 млн. руб./год. Результаты диссертации использованы в научной деятельности и учебном процессе в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Сарычев, В.Д. Модель перемешивания слоев, созданных при электровзрывной обработке [Текст] / В.Д. Сарычев, А.Ю. Грановский, Е.В. Черемушкина [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2013. – Т. 10. – № 4. – С. 558-562.
 2. Сарычев, В.Д. Механизмы образования градиентных структурно-фазовых состояний в материалах [Текст] / В.Д. Сарычев, С.А. Невский, А.Ю. Грановский [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2018. – Т. 15. – № 1. – С. 62-67.
 3. Сарычев, В.Д. Математическая модель расчета температурных полей при прерывистом охлаждении проката [Текст] / В.Д. Сарычев, В.Е. Громов, А.Ю. Грановский [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2016. – Т. 13. – № 3. – С. 339-342.
 4. Грановский, А.Ю. Модель формирования внутренних нанослоев при сдвиговых течениях материалов [Текст] / А.Ю. Грановский, В.Д. Сарычев, В.Е. Громов // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – № 10. – С. 155-158.
 5. Сарычев, В.Д. Гидродинамическая модель образования наноструктурных слоев [Текст] / В.Д. Сарычев, А.Ю. Грановский, С.Н. Старовацкая [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 6. – С. 87-89.
 6. Гагарин, А.Ю. Импульсное магнитное поле для создания на поверхности металлов полей высоких температур [Текст] / А.Ю. Гагарин, В.Е. Громов, В.Д. Сарычев, Е.В. Черемушкина, А.Ю. Грановский // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21. – № 3. – С. 926-929.
 7. Сарычев, В.Д. Механизм взаимодействия твёрдых и жидких металлов при ультразвуком воздействии [Текст] / В.Д. Сарычев, А.И. Низовский, А.А. Новиков, А.Ю. Грановский [и др.] // Доклады Академии наук. – 2018. – Т. 479. – С. 262-265.
- Sarychev, V.D. Mathematical model of ultrasound transmission in gradient materials synthesized in arc surfacing under contact loading / V.D. Sarychev, A.Y. Granovskiy, S.A. Nevskii [et al.] // Materials Physics and Mechanics. – 2017. – Vol. 32. – No. 2. – P. 186-193.

Статьи в других изданиях

1. Сарычев, В.Д. Модель образования наноструктур в рельсовой стали при длительной эксплуатации [Текст] / В.Д. Сарычев, С.А. Невский, С.В. Коновалов, А.Ю. Грановский // Математическое моделирование в естественных науках. – 2015. – Т. 1. – С. 394-398.

Статьи в зарубежных и переводных рецензируемых изданиях

1. Sarychev, V.D. Model of formation of droplets during electric arc surfacing of functional coatings / V.D. Sarychev, A.Y. Granovskii, S.A. Nevskii [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1698. – P. 30013.
2. Sarychev, V.D. Numerical simulation of hydrodynamic flows in the jet electric / V.D. Sarychev, A.Y. Granovskii, S.A. Nevskii // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 110. – P. 012043.
3. Chinakhov, D.A. Modeling hydrodynamic flows in plasma fluxes when depositing metal layer on the surface of catalyst converters / D.A. Chinakhov, V.D. Sarychev, A.Y. Granovsky [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 50. – P. 12050.
4. Sarychev, V.D. Stress-strain state of gradient materials under inclined contact load / V.D. Sarychev, A.Y. Granovskii, S.A. Nevskii [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1909. – P. 20185.
5. Sarychev, V.D. Mathematical model of nanostructure formation in rail steel under high intensive mechanical loading / V.D. Sarychev, S.A. Nevskii, A.Y. Granovskii [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1683. – P. 20200.
6. Sarychev, V.D. Formation mechanisms of gradient structural phase states in the materials / V.D. Sarychev, S.A. Nevskii, A.Y. Granovskii [et al.] // Basic problems of material science / ed. M.D. Starostenkov. – Барнаул: ООО "Научно-исследовательский центр "Системы управления", 2018. – P. 48-52.
7. Sarychev, V.D. Model of convection mass transfer in titanium alloy at low energy high current electron beam action / V.D. Sarychev, A.Y. Granovskii, S.A. Nevskii [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 168. – P. 12031.
8. Sarychev, V.D. Mathematical modelling of convective processes in a weld pool under electric arc surfacing / V.D. Sarychev, A.Y. Granovskii, S.A. Nevskii [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 168. – P. 12039.

Монографии

1. Сарычев, В.Д. Математические модели и механизмы формирования градиентных структур в материалах при внешних энергетических воздействиях [Текст] / В.Д. Сарычев, С.А. Невский, А.Ю. Грановский [и др.]. – Новокузнецк: изд. центр СибГИУ, 2017. – 320 с.
2. Райков, С.В. Структура, фазовый состав и свойства поверхностных слоев титановых сплавов после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки [Текст] / С.В. Райков, Л.П. Бащенко, Н.А. Соскова, В.Д. Сарычев, Б.Б. Хаимзон, А.Ю. Грановский [и др.]; ред. В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Е.А. Будовских. – Новокузнецк: «Интер-Кузбасс», 2012. – 435 с.

Статьи и тезисы докладов в трудах конференций:

1. Устюжанин, С.В. Модели формирования капель на электроде при электросварных технологиях [Текст] / С.В. Устюжанин, А.Ю. Грановский,

- В.Д. Сарычев. – В кн.: Наука и молодежь: Проблемы, Поиски, Решения. 2017. С. 39-42.
2. Поданев, А.П., Грановский А.Ю., Сарычев В.Д. Модель перемешивания в ванне расплава при электродуговой наплавке [Текст] / А.П. Поданев, А.Ю. Грановский, В.Д. Сарычев. – В кн.: Наука и молодежь: Проблемы, Поиски, Решения. 2017. С. 45-47.
 3. Сарычев, В.Д. Экспериментальное и теоретическое исследование устойчивости в слоях жидкого металла, полученного при пропускании мегаамперных токов наносекундной длительности [Текст] / В.Д. Сарычев, А.Ю. Гагарин, А.Ю. Грановский. – В кн. Тезисы докладов XI Всероссийской конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория и новые технологии» / Под ред. В.В. Козлова. 2017. С. 109-110.
 4. Сарычев, В.Д. Модель прохождения ультразвука в градиентном материале [Текст] / В.Д. Сарычев, А.Ю. Гагарин, А.Ю. Грановский. – В кн.: VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Сборник материалов. – М.: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), 2017. С. 185-187.
 5. Сарычев, В.Д. Изучение формирования гетерогенных плазменных потоков при электрическом взрыве проводников [Текст] / В.Д. Сарычев, С.А. Невский, А.Ю. Грановский [и др.]. – В кн.: Сборник тезисов LVIII международной конференции «Актуальные проблемы прочности». – Пермь: Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, 2017. С. 56-61.
 6. Гагарин, А.Ю. Распределение температурных полей при поверхностной обработки металлов импульсным магнитным полем [Текст] / А.Ю. Гагарин, В.В. Сарычев, Е.С. Черемушкина, А.Ю. Грановский [и др.]. – В кн.: Новые материалы и технологии. 2015. С. 19-25.

Подписано в печать 12.03.2019.
Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,98. Уч. изд. л. 2,21. Тираж 100 экз. Заказ № .
Сибирский государственный индустриальный университет.
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42
Издательский центр СибГИУ