

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. ректора Тамбовского государственного  
университета им. Г.Р. Державина  
доктор философских наук, профессор  
Ирина Владимировна Налетова



«01» апреля 2022 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

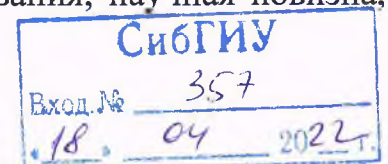
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина» на диссертационную работу «Физическая природа формирования градиентных структурно-фазовых состояний и свойств металлов и сплавов на основе комбинированных неустойчивостей при внешних энергетических воздействиях», представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния Невским Сергеем Андреевичем.

### Актуальность темы диссертационного исследования

Решение задач, направленных на разработку технологических режимов управления структурой и свойствами металлов и сплавов, а также технологических процессов изготовления изделий ответственного назначения является практически востребованным. Для получения материалов с заданными физическими и эксплуатационными свойствами, характеристиками структуры и фазового состава перспективными являются технологии с применением внешних энергетических воздействий. Исследования в этом направлении позволят выработать критерии для внедрения таких воздействий в практическое производство на основе детального анализа физической природы и свойств используемых металлов и сплавов. В связи с этим, 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 безусловно является **актуальной**.

Диссертация включает в себя введение, 6 глав, основные выводы, список литературы из 346 наименований, приложения, изложена на 247 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков, 21 таблицу.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, степень ее разработанности, приведены цели и задачи исследования, научная новизна,



научная и практическая значимости работы, представлены методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности полученных результатов исследования, указаны вклад автора и апробация результатов исследования.

**В первой главе** дается обзор литературы по результатам исследования воздействия электрических полей и токов, электронно-пучковой обработки и интенсивной пластической деформации на структуру и свойства металлов и сплавов. Показана перспективность применения комбинированных сдвиговых неустойчивостей к поиску механизмов формирования структурно-фазовых состояний и свойств металлических материалов. Сформулированы цель и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена методологии диссертационного исследования. В ней описан подход, основанный на анализе начальных стадий неустойчивости течения материалов на разных масштабных уровнях, от макроуровня (неустойчивость пластического течения при одноосном растяжении) до микро и нано (комбинированные неустойчивости, наблюдающиеся при воздействии концентрированных потоков энергии и интенсивной пластической деформации). Он предполагает анализ дисперсионных уравнений, из которых получают зависимости скорости роста возмущений от длины волны. Длина, волны при которой наблюдается максимум данной зависимости, будет определять размеры вихревых паттернов, которые в свою очередь преобразуются в ячейки кристаллизации.

**В третьей главе** изучен процесс локализации пластического течения материалов при воздействии импульсного электрического тока с помощью двухэкспозиционной спекл-интерферометрии и фильтрационной модели пластичности. Показано, что зависимости скоростей смещений имеют форму «ударного перехода» в двухфазной гетерогенной среде, поэтому автором была применена фильтрационная модель, описанная в предыдущей главе. Оценки скорости очагов локализации, полученные с помощью данной модели, практически совпали с их экспериментальными значениями, определенными из хронограмм пластического сдвига.

**В четвертой главе** исследовано влияние гетерогенных плазменных потоков и последующей электронно-пучковой обработки на структурно-фазовые состояния систем Ti-Y и Al-Si-Y. Установлено, что развитый рельеф поверхности раздела «покрытие/подложка», полученный гетерогенным плазменным потоком, обусловлен возникновением неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора. Найден диапазон скоростей, при котором неустойчивость Кельвина-Гельмгольца начинает преобладать над неустойчивостью Рэлея-Тейлора. Структурные трансформации в рассматриваемых системах при последующей электронно-пучковой обработке изучались в двух областях: 1) зона оплавления; 2) зона термического влияния. Показано, что в зоне оплавления образование структуры ячеистой кристаллизации происходит по механизму комбинированной неустойчивости, которая включает в себя термокапиллярную, концентрационно-капиллярную, испарительно-



капиллярную и термоэлектрическую неустойчивости. В зоне термического влияния образование наноструктур осуществляется за счет распада частиц второй фазы, механизм которого заключается в развитии двух неустойчивостей: динамической неустойчивости и неустойчивости Рэлея-Тейлора.

**Пятая глава** посвящена изучению процесса образования микро- и наноструктурно-фазовых состояний в рельсовой стали перлитного класса за счет распада частиц цементита. Как и образование волнообразного рельефа, описанное в главе 4, так и распад частиц цементита обусловлены возникновением и развитием комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора. При анализе этой неустойчивости использована зависимость вязкости стали от структурно-масштабного уровня. Выбирались значения вязкости соответствующие наномасштабному уровню. Показано, что учет ускорения слоя, занимаемого движущейся жидкостью, приводит к смещению значений длины волны, при которой наблюдается максимум декремента возмущений границы раздела «феррит/цементит», в микро- и нанодиапазонах при значениях продольной скорости слоя порядка 0,01 м/с.

**В шестой главе** приведены практические приложения комбинированных сдвиговых неустойчивостей для оптимизации технологических процессов нанесения износостойких покрытий и плазменной наплавки.

**Общие выводы** приведены в заключении работы.

**Приложения** содержат справки об использовании результатов диссертации в промышленности и учебном процессе.

### **Научная новизна выводов, сформулированных в работе**

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  $\gamma$ , 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.

### **Степень достоверности и обоснованности результатов**

Достоверность результатов диссертационного исследования обеспечена корректностью постановки задач, применением современных теоретических и экспериментальных методов физики конденсированного состояния, сертифицированных компьютерных программ.

Положения, выносимые на защиту, и основные выводы являются обоснованными. Они подтверждены научными результатами, непротиворечащими физическим теориям и согласуются с научными результатами, полученными другими авторами.

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, доложены на представительных международных конференциях. Получен 1 патент на изобретение.

### **Научная значимость и практическая ценность**

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  $\lambda_m$ , при которой достигается максимум скорость роста возмущений поверхности раздела, от величины плотности энергии электронного пучка. С ростом плотности энергии пучка электронов величина  $\lambda_m$  снижается, переходя из микродиапазона в нанодиапазон. 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 исследований, могут быть использованы при создании методов управления структурой и свойствами металлических материалов с помощью электрических полей, концентрированных потоков энергии и интенсивной пластической деформации.

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».

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

Научные результаты работы представляют интерес для ряда ВУЗов страны и научных организаций: Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Самарский государственный университет, Московский институт стали и сплавов, Воронежский государственный технический университет, Тольяттинский государственный университет,

Тульский государственный технический университет, Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Институт физики твердого тела РАН, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, ЦНИИЧерМет им. И.П. Бардина и др. и могут быть использованы при разработке спецкурсов для бакалавров и магистрантов по «Физике конденсированного состояния», «Физическому материаловедению» и написании монографий.

### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертация по своей цели, поставленным задачам и основному содержанию соответствует паспорту специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния (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»).

### **Соответствие автореферата диссертации**

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

### **Замечания**

Диссертация Невского С.А. не свободна от недостатков, которые заключаются в следующем:

1. Автор не обосновывает исследования влияния электрического тока на локализацию пластической деформации только на стадии площадки текучести, не затрагивая стадии линейного и параболического упрочнения. Эти исследования существенно усилили бы работу и позволили бы отследить эволюцию процесса локализации пластической деформации.
2. В работах Л.Б.Зуева и В.И.Данилова локализация пластической деформации описывается в рамках автоволнового подхода. В чем преимущество используемой автором фильтрационной модели локализации пластической деформации?
3. С чем связан выбор автором для теоретических исследований влияния внешних энергетических воздействий на структуру и свойства таких различных металлических материалов: сталь 08пс, технически чистый титан, эвтектический силумин, рельсовая сталь?
4. Моделирование процесса образования волнообразного рельефа поверхности раздела «покрытие/подложка» электровзрывным гетерогенным плазменным потоком, автор проводит с использованием гипотезы о наличии комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора, но не



рассматривает гипотезу о возникновении неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, которая имеет место при импульсных энергетических воздействиях.

5. В параграфах 2.4 и 4.2, посвященных воздействию электронного пучка на формирование структурных состояний металлических материалов, диссертант выдвигает гипотезу о возникновении помимо термокапиллярной, испарительно-капиллярной, концентрационно-капиллярной неустойчивостей еще и термоэлектрической неустойчивости. Из текста диссертации не понятно, каким образом в жидкости возникает термоэлектрическое поле и как конвективное течение расплава оказывает влияние на величину термоэлектрического коэффициента.
6. При изучении процессов распада пластин цементита рельсовой стали при интенсивной пластической деформации по схеме длительной эксплуатации, автор слишком много уделил внимания комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора. Имеют ли место альтернативные механизмы дробления цементита, например, блокировка пластического сдвига препятствиями или для их реализации нужны особые условия.
7. К сожалению, в главе 6 автор не привел сведений об использовании результатов исследования влияния электрического тока на процесс локализации пластической деформации в промышленности. Такие данные существенно усилили бы работу.

Сделанные замечания не снижают научной и практической значимости результатов, полученных в диссертационной работе, не влияют на общую положительную оценку работы и не ставят под сомнение полученные выводы.

### **Заключение**

Научный уровень, решаемых задач, объем и актуальность выполненных исследований, обоснованность, вынесенных на защиту положений, достоверность и научная новизна, полученных результатов, их значимость для науки и практики позволяют считать, что диссертация Невского С.А. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена научная проблема установления физической природы и механизмов формирования градиентных микро- и наноструктурно-фазовых состояний металлических материалов при внешних энергетических воздействиях на основе комбинированных сдвиговых неустойчивостей, имеющая важное хозяйственное значение. Диссертация удовлетворяет требованиям и критериям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям п.П.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года (в редакции от 11.09.2021 г.), а ее автор Невский Сергей Андреевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Диссертация С.А. Невского заслушана и обсуждена на научном семинаре кафедры теоретической и экспериментальной физики Тамбовского государственного университета имени Г.Р. Державина, где получила одобрение (протокол № 7 от «29» марта 2022 г.).

На заседании присутствовало 14 сотрудников кафедры теоретической и экспериментальной физики.


**Результаты голосования:** «За» - 14, «Против» - нет. «Воздержалось» – нет.

**Отзыв подготовил:**

Заслуженный деятель науки РФ, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, (научная специальность 01.04.07 - физика конденсированного состояния)

 Федоров Виктор Александрович

Ученый секретарь, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики

 Плужникова Татьяна Николаевна

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина», 392000, Центральный федеральный округ, Тамбовская область, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33.

Контактные телефоны: 8 (4752) 72-34-34, доб. 2018. E-mail: post@tsutmb.ru

31. 03. 2022 г.

