

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Невского Сергея Андреевича «Физическая природа формирования градиентных структурно-фазовых состояний и свойств металлов и сплавов на основе комбинированных неустойчивостей при внешних энергетических воздействиях», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

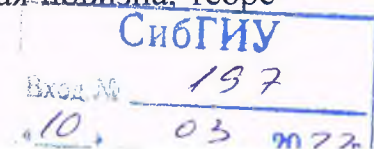
**Актуальность работы.** Проблема создания новых материалов, обладающих высокими физико-механическими свойствами, является неисчерпаемой для исследователей. В настоящее время интерес к ней только усиливается, так как появляются новые способы воздействия на вещество, расширяются возможности управления формированием новых структурно-фазовых состояний, а также совершенствуются методы исследования свойств материалов. Здесь задачи управления процессами формирования заданных функциональных свойств материалов и определения оптимальных параметров их обработки являются ключевыми. Для их решения очень важно выявить механизмы происходящих в веществе изменений в зависимости от параметров материального и энергетического воздействия на него.

Комбинированная обработка, включающая в себя воздействие гетерогенными плазменными потоками и последующую обработку низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками, зарекомендовала себя как один из перспективных инструментов создания структуры и фазового состава материалов, которые обеспечивают их высокие физико-механические свойства. Однако, несмотря на то, что в настоящее время накоплен и опубликован обширный экспериментальный материал по данной тематике, имеется большой недостаток в работах, которые бы содержали систематические исследования механизмов и закономерностей изменений, происходящих в облучаемом веществе под действием гетерогенных плазменных потоков и электронных пучков. Диссертация Невского Сергея Андреевича направлена на решение именно этой проблемы. Поэтому её тематика, а также полученные в ней результаты являются актуальными, представляют большой научный и практический интерес.

Следует отметить, что всесторонние комплексные исследования механизмов взаимодействия плазменных потоков с веществом востребованы не только в области модифицирования свойств материалов. Они нужны для проведения радиационных испытаний, решения задач авиационного и космического материаловедения, атомной энергетики и т.д.

**Структура и содержание диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, основных выводов, списка литературы из 346 наименований, приложений. Она изложена на 247 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков, 21 таблицу.

Во **введении** содержится общая характеристика работы. Обоснована актуальность темы исследований, проанализирована степень разработанности темы, сформулированы цели и задачи, изложена научная новизна, теоре-



тическая и практическая значимость работы, кратко описаны методы исследования. Представлены положения, вынесенные на защиту. Сделаны выводы о достоверности полученных результатов. Приведены сведения об апробации работы, о публикациях и личном вкладе диссертанта. Сделан анализ соответствия диссертации паспорту специальности. Кратко описана структура диссертационной работы.

**В первой главе** предлагается анализ современного состояния проблемы в области моделирования формирования структурно-фазовых состояний при воздействии концентрированных потоков энергии, электрических и механических полей. Особое внимание уделено гидродинамическим механизмам образования микро- и наноструктурных состояний за счет различных неустойчивостей. Приведён ряд типичных результатов экспериментальных и теоретических исследований изменения структурных и физико-химических свойств материалов под действием низкоэнергетических сильнофокусированных электронных пучков, электрических полей и интенсивной пластической деформации, содержащихся в научной литературе и не получивших к настоящему времени ясного описания их механизмов и закономерностей. Сделана постановка цели и задач исследований.

**Во второй главе** содержится описание использованных автором методов и подходов, на базе которых были построены детальные исследования формирования структурно-фазовых состояний металлов и сплавов. Для изучения локализации пластического течения материалов применялся двухфазный подход, согласно которому деформируемая среда разбивается две фазы. Первая фаза является возбужденной. Она отвечает за структурные превращения. Вторая фаза – невозбужденная, не связанная со структурными превращениями. Взаимодействие этих фаз порождает неустойчивость пластического течения материала и образование волны пластичности. Для решения задач поиска механизмов формирования микро- и наноструктур при воздействии концентрированных потоков энергии и интенсивной пластической деформации применены представления о возникновении комбинированных сдвиговых неустойчивостей.

**В третьей главе** исследована локализация пластической деформации материалов при воздействии импульсного электрического тока на примере малоуглеродистой стали марки 08пс на стадии площадки текучести. Методами двухэкспозиционной спекл-интерферометрии получены значения скоростей очагов локализации, которые без воздействия тока лежат в пределах от 0,0925 до 0,1044 мм/с и от 0,1369 до 0,1722 мм/с при воздействии тока. По мнению автора, причиной увеличения скорости очагов локализации является неоднородный нагрев тела и границы зерна вследствие их различных электрических сопротивлений. Он способствует перераспределению возбужденной фазы на границах очага локализации. Оценки предельной скорости очагов локализации с помощью фильтрационной модели пластичности подтвердили данную гипотезу.

**В четвертой главе** изучено влияние гетерогенных плазменных потоков и последующей электронно-пучковой обработки на структурно-фазовые со-



стояния систем Ti-Y и Al-Si-Y. Сначала рассматривалось воздействия гетерогенного плазменного потока, содержащего частицы иттрия, сформированного электрическим взрывом проводников на поверхность титана и силумина. Установлено, что формирование развитого волнообразного рельефа поверхности раздела «покрытие/подложка» обусловлено возникновением и развитием комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора. Формирование поверхностных структур субмикро- и наноструктурного диапазона при последующей электронно-пучковой обработке в зоне оплавления обусловлено комбинированной термо-испарительно-капиллярной и термоэлектрической неустойчивостью. Установлен диапазон значений термоэлектрического коэффициента, при котором влияние электрических полей становится значимым. Эти выводы подтверждаются данными металлографических исследований. В зоне термического влияния электронного пучка распад частиц второй фазы обусловлен двумя видами неустойчивости – динамической неустойчивостью и неустойчивостью Рэлея-Тейлора.

**В пятой главе** проведено исследование процессов распада пластин цементита в высокоуглеродистой стали перлитного класса подвергнутой интенсивной пластической деформации по схеме длительной эксплуатации на железной дороге. Показано, что образование наноразмерных частиц цементита обусловлено комбинированной неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора.

**В шестой главе** анализируются отдельные аспекты применения плазменных энергетических воздействий для модификации материалов. Показано, что основной проблемой их внедрения является подбор оптимальных режимов обработки. Теоретические исследования, приведенные в диссертационной работе, позволяют найти данные режимы обработки. Наиболее интересным результатом данной главы являются зависимости длины волны, на которую приходится максимум скорости роста возмущений поверхности раздела «покрытие/подложка», от величины зарядного напряжения и длительности импульса. Они позволяют найти режим обработки, обеспечивающий высокую адгезионную стойкость покрытий.

**В заключении** диссертационной работы сформулированы основные результаты и выводы.

**В приложениях** приведены акты и справки об использовании результатов диссертации в промышленности и учебном процессе.

**Научная новизна.** В работе получен ряд новых научных результатов, основными из которых являются следующие:

1. Установлено, что воздействие импульсного электрического тока на локализацию пластического течения малоуглеродистой стали приводит к увеличению в 1,65 раза 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, что облегчает сдвиг зерен относительно друг друга. На основе данных представлений с применением фильтрационной модели пла-

стической деформации рассчитана скорость распространения очагов локализации при воздействии импульсного электрического тока. Результаты моделирования показали полное соответствие с экспериментом.

2. Установлен механизм и впервые создана модель формирования поверхностных структур субмикро- и наноразмерного диапазона титановых и алюминиевых сплавов при электронно-пучковой обработке на основе представлений о возникновении в расплавленном слое комбинированной термо-, концентрационно-, испарительно-капиллярной и термоэлектрической неустойчивости. Найден диапазон значений плотности энергии пучка электронов и термоэлектрического коэффициента  $\gamma$ , при которых максимум скорости роста находится в субмикро- и наноразмерном диапазонах.

3. Впервые предложен механизм формирования волнообразного рельефа границы раздела «покрытие /подложки» при нанесении покрытия на титановые и алюминиевые сплавы гетерогенным плазменным потоком, заключающиеся в образовании комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора.

4. Теоретически установлены механизмы формирования микро и наноразмерных структурно-фазовых состояний в рельсовой стали при длительной эксплуатации, заключающиеся в распаде пластин цементита за счет комбинированной неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора.

**Положения, вынесенные на защиту**, и выводы диссертации являются **обоснованными** и следуют из результатов работы. Их состоятельность проверена в ходе проведения научных исследований. Полученные данные согласованы с результатами других исследователей и не противоречат уже известным научным фактам.

**Достоверность результатов**, полученных в диссертационной работе, не вызывает сомнений, так как она обеспечивается корректностью постановки задач, хорошим согласием результатов экспериментальных и теоретических исследований. Результаты работы представлены на международных конференциях и опубликованы 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 мероприятиях. Получен 1 патент на изобретение.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Результаты диссертационной работы способствуют углубленному развитию физики взаимодействия электрических и тепловых полей с конденсированным веществом. Предложенные в работе физико-математические модели могут быть применены для прогнозирования поведения материалов в различных технологических процессах и при эксплуатации. Ценными, с точки зрения практического использования, являются зависимости скорости роста возмущений поверхности раздела от зарядного напряжения и длительности импульса. Они позволяют найти режимы обработки гетерогенными плазменными потоками, обес-



печивающие высокую адгезию покрытий с подложкой, что является особенно важным для биоинертных покрытий. Полученные результаты могут найти применение в создании научных основ новых технологий модифицирования структурно-фазовых состояний и функциональных свойств различных материалов с помощью плазменных энергетических воздействий.

**Автореферат и основные публикации** полностью отражают содержание диссертации.

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне **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»).

Диссертационная работа Невского Сергея Андреевича не свободна от недостатков:

1. Влияние импульсного электрического тока на процесс локализации пластической деформации изучено лишь при одном режиме обработки (амплитудное значение плотности тока  $175 \text{ А/мм}^2$ , длительность импульса 100 мкс, период пропускания 100 мс (частота следования импульсов 10 Гц)). Нет экспериментальных данных по значению скорости очагов локализации при других значениях тока. Это существенно усилило бы работу и позволило бы построить зависимости скорости очагов локализации от амплитуды плотности тока и длительности импульса. Применяемая двухфазная фильтрационная модель не дает ответа на вопрос о том, каким образом будет меняться скорость очагов локализации при других режимах токовой обработки.
2. Приводимый в разделе 4 механизм образования волнообразного рельефа поверхности раздела при воздействии гетерогенных плазменных потоков, созданных электрическим взрывом проводников, за счет возникновения комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора, на мой взгляд, не дает полного объяснения данному процессу, так как протекает в неизотермических условиях. Из постановки задачи не ясно, каким образом диссертант учитывает зависимость теплофизических параметров материала от температуры.
3. При анализе гидродинамических течений материалов при обработке низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком в расплавленных слоях следовало бы привести оценки времени существования расплавленного слоя и времени развития комбинированной термо-, концентрационно-, испарительно-капиллярной и термо-электрической неустойчивости в зависимости от плотности энергии

пучка электронов и длительности импульса и произвести их сравнение, что сделало бы представленную модель более достоверной.

4. К сожалению, автором не проведен численный анализ нелинейной стадии комбинированной термо-, концентрационно-, испарительно-капиллярной и термоэлектрической неустойчивости. Такие данные, несомненно усилили бы диссертационную работу и позволили бы подобрать режимы электронно-пучковой обработки, обеспечивающие высокие физико-механические свойства металлических материалов.
5. По результатам анализа начальной стадии неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора автором на примере систем Ti-Zr и Ti-Nb были установлены степенные зависимости длины волны, при которой наблюдается максимум скорости роста возмущений поверхности раздела от зарядного напряжения и длительности импульса. Будут ли наблюдаться подобные зависимости для систем Ti-Y и Al-Si-Y?
6. На странице 158 диссертации автор приводит значения размеров зерен, содержащих разрушенный перлит, и субзерен, наблюдающихся в поверхностном слое головки рельсов. Было бы желательно привести объем статистической выборки. Эта информация необходима для оценки надежности представленных результатов и сделанных на их основе выводов, которые привели автора к построению модели на основе комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора. С учетом наблюдаемой на практике неоднородности морфологии структур данное обстоятельство существенно даже при сопоставлении структур однотипной металлопродукции, полученной в рамках штатной, отлаженной технологии.
7. При исследовании процесса распада пластин цементита рельсовой стали при интенсивной пластической деформации по механизму комбинированной неустойчивости следовало бы уделить большее внимание вязкоупругому приближению. Автор приводит лишь решение дисперсионного уравнения, полученное численными методами, тогда как в литературе приводятся нейтральные кривые, позволяющие найти области возникновения неустойчивости. Было бы желательно привести подобные кривые и определить диапазон параметров, при которых данная неустойчивость наблюдается.

Перечисленные замечания не являются принципиальными, они не опровергают основные результаты работы и не меняют ее общую положительную оценку.

**Заключение.** По уровню решаемых задач, объему выполненных исследований, их актуальности, обоснованности вынесенных на защиту положений, достоверности и научной новизне полученных результатов, их значимости для науки и практики диссертация Невского С.А. отвечает требованиям,

предъявляемым к докторским диссертациям Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. В том числе диссертация соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней. Она является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена научная проблема установления физической природы формирования градиентных структурно-фазовых состояний металлических материалов при внешних энергетических воздействиях на основе комбинированных сдвиговых неустойчивостей, имеющая важное хозяйственное значение.

На основании вышеизложенного, считаю, что автор диссертации, Невский Сергей Андреевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния.

Даю свое согласие на включение моих персональных данных в аттестационное дело С.А. Невского и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

Доктор технических наук (специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния), профессор, профессор отделения контроля и диагностики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Адрес: 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30.

Телефон: +7(3822) 701777 Вн.т.3495

E-mail: ghyngazov@tpu.ru

Гынгазов  
Сергей Анатольевич

Подпись Гынгазова С.А. удостоверяю  
Ученый секретарь Томского  
политехнического университета

Кулинич Е.А.

Печать

« 01 » 03 2022 года