

на правах рукописи



Красавин Александр Львович

**ФОРМИРОВАНИЕ УПРОЧНЯЮЩИХ НАНОСТРУКТУР В ПОРОШКОВЫХ
ПОКРЫТИЯХ НА ОСНОВЕ Ni И Co ПРИ МОДИФИЦИРУЮЩЕМ
ОБЛУЧЕНИИ**

Специальность: 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Барнаул - 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., профессор
Старостенков Михаил Дмитриевич

Официальные оппоненты:

Квеглис Людмила Иосифовна,
д.ф.-м.н., профессор, ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»,
профессор кафедры «Материаловедение
и технологии обработки материалов»

Курзина Ирина Александровна,
д.ф.-м.н., доцент, ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский
Томский государственный университет»,
профессор кафедры «Физическая и
коллоидная химия»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Томский Государственный
Архитектурно-Строительный
Университет», г.Томск

Защита состоится «27» апреля 2016 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.04 при Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46;

e-mail: veronika_65@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

<http://www.altstu.ru/structure/unit/odia/scienceevent/2766/>

Автореферат разослан «__»_____2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,
доцент



Романенко В.В.

Примечание: отзывы на автореферат, заверенные печатью организаций, просим присылать в **2-х экз.** на адрес университета и e-mail: veronika_65@mail.ru

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Метод плазменного нанесения порошковых покрытий - это современный и перспективный метод, позволяющий наносить покрытия из тугоплавких металлических материалов или из керамики на различные подложки [1-4]. Можно сформировать определенные наноструктуры в материалах покрытий, нанесенных с помощью этого метода, так как известно, что особенно эффективно аморфные или наноструктурные состояния достигаются при высоких скоростях нагрева, высоком давлении, и кратковременном воздействии высоких температур [1, 5]. Так как покрытия осаждаются при высоких температурах плазмы, то можно ожидать формирования термически стабильных покрытий. Термическую стабильность плазменно-осажденных покрытий, можно обеспечить за счет образования кристаллических интерметаллических соединений в процессе нанесения покрытий, а также за счет увеличения объемной доли интерметаллидов в покрытии при дополнительном облучении [2, 3, 6]. В работах [2,3] указывают, что интерметаллические соединения, образующиеся в толще порошковых покрытий на основе Ni или Co, нанесенных плазменной струей на стальные подложки, способны улучшить коррозионную стойкость и прочность данных покрытий.

Развитие передовых технологий плазменного нанесения порошковых покрытий на различные подложки сдерживается проблемами качества таких покрытий, такими как неоднородность структуры покрытия, пористость, плохая адгезия к подложке [1-4]. Соответственно, достаточно толстые покрытия имеют недостаточно высокую твердость и коррозионную стойкость [2, 3]. Для преодоления этих недостатков применяют комбинированные обработки - дополнительное облучение плазменной струей или электронным пучком [1-3]. Соответственно, возникает вторая проблема: как выбрать режимы дополнительного облучения? Исходя из того, что основными факторами, влияющими на процессы распада твердого раствора покрытий и диффузии их компонентов, являются температура и концентрация элементов в твердом растворе [7,8], можно рекомендовать выбор режимов модифицирующего облучения. Выбор таких режимов облучения, как плотность мощности и скорость движения источника можно делать исходя из анализа формирующихся при данных режимах в покрытиях температурных профилей и их сравнения с известными фазовыми диаграммами систем, включающими основные компоненты конкретных покрытий. Проведя сравнение экспериментальных данных о структурно-фазовом состоянии покрытий после облучения с расчетными температурными профилями, можно установить оптимальные режимы облучения, которые не вызывают чрезмерного нагрева покрытий, но в то же время приводят к улучшению их фазового состава (формированию упрочняющих наночастиц) и к улучшению адгезии покрытий к подложке за счет ускорения диффузионных процессов между покрытием и подложкой. Можно достичь высоких значений твердости за счет выделения упрочняющих наноразмерных интерметаллидов, которые устойчивы к воздействию высоких температур (жаропрочные) [6], и сформировать прогнозируемые структуры с за счет радиационно-пучкового воздействия.

Цель работы: установить закономерности формирования при модифицирующем облучении в порошковых покрытиях на основе Ni и Co,

нанесенных плазменной струей на стальные подложки, структур с наноразмерными частицами упрочняющих интерметаллидных фаз заданной морфологии (наноструктур), обладающих улучшенными физико-химическими свойствами.

Для достижения цели работы необходимо было решить следующие *задачи*:

1. Выявить особенности структурно-фазового состояния порошковых покрытий на основе Ni и Co, нанесенных плазменной струей на стальные подложки, чтобы сделать заключение о том, какие изменения данного состояния желательны в процессе модификации облучением.
2. Разработать модель распространения температурного поля в системе «покрытие-подложка» при нагреве движущимся источником облучения и решить нелинейную задачу теплопроводности для двухслойных металлических поглотителей при облучении, чтобы прогнозировать температурные профили в материалах при разных режимах радиационного воздействия (плотности мощности и скорости источника).
3. Провести численный эксперимент по расчетам температурных профилей в системе «покрытие-подложка» при нагреве движущимся источником облучения, чтобы на основе сравнения расчетных температурных профилей с фазовыми диаграммами систем, включающими основные компоненты конкретных покрытий, дать рекомендации по выбору режимов модифицирующего облучения.
4. Провести облучение покрытий по рекомендованным режимам плазмой и электронным пучком постоянного тока, исследовать структуры и свойства модифицированных покрытий и сделать сравнительный анализ полученных данных с соответствующими параметрами для тех же покрытий до модификации, установить закономерности изменения структурно-фазового состояния в облученных покрытиях и их влияние на изменение ряда свойств покрытий (микротвердость и коррозионная стойкость).
5. Дать научно-обоснованные практические рекомендации по выбору типа и режимов модифицирующего облучения, чтобы обеспечить формирование заданных структурно-фазовых состояний в покрытиях на основе Ni и Co на стальных подложках и, соответственно, обеспечить улучшение их физико-химических свойств.

Объектом исследований являлись структурно-фазовые превращения в защитных порошковых покрытиях на основе Ni и Co, твердый раствор которых распадается с формированием упрочняющих наночастиц, а также процессы теплопереноса при модифицирующей обработке данных материалов облучением, обуславливающие формирование заданного температурного профиля и изменение фазового состава и функциональных свойств.

Предмет исследований: эволюция структурного состояния конденсированного вещества в условиях, далеких от равновесия, а также процесс уменьшения структурной неравновесности за счет контролируемого распада с формированием наноструктурированного композита и радиационно-стимулированной диффузии.

Методология исследования: математическое моделирование температурных профилей при нагреве движущимся источником облучения и экспериментальное исследование структуры и свойств модифицированных покрытий (просвечивающая

и сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионным анализом, рентгеноструктурный фазовый анализ, атомно-силовая микроскопия, исследование коррозионной стойкости и механических свойств).

Научная новизна работы заключается в том, что **впервые**:

- разработана модель распространения температурного поля в системе «покрытие-подложка» при нагреве движущимся источником облучения и оригинальный алгоритм для расчетов численными методами температурных полей по заданным технологическим параметрам при процессах теплопереноса в металлических двухслойных поглотителях, позволяющие прогнозировать температурные профили в материалах при разных режимах радиационного воздействия (плотности мощности и скорости источника);

- выявлены закономерности формирования наноразмерных интерметаллидов в процессе нанесения порошковых Ni или Co покрытий плазменной струей на стальные подложки и при модифицирующем облучении, а именно: при достижении расчетных температур, в приближенном соответствии с фазовыми диаграммами состояния, в покрытиях начинается распад твердого раствора с выделением наноразмерных фаз пластинчатой морфологии CrNi_3 или $\text{Co}_{0.8}\text{Cr}_{0.2}$ соответственно, то есть наблюдается прерывистый распад твердого раствора покрытий, ускоренный за счет радиационно-стимулированной диффузии;

- установлены закономерности эволюции структурно-фазового строения порошковых покрытий на основе Ni и Co при модифицирующем облучении, приводящие к улучшению их функциональных свойств, заключающиеся в увеличении объемной доли упрочняющих интерметаллидных фаз пластинчатой морфологии и уменьшении объемной доли оксидов на поверхности покрытия, в увеличении в 1,5-2 раза ширины диффузионной зоны от покрытия к подложке и в формировании однородной микроструктуры покрытия за счет ускорения процессов диффузии и прерывистого распада твердого раствора при облучении.

Научная и практическая значимость работы. Совокупность полученных в работе экспериментальных и теоретических результатов позволила разработать научные основы энергосберегающей технологии модификации порошковых покрытий на основе Ni и Co облучением для формирования в них заданных наноструктур с улучшенными эксплуатационными свойствами. Зарегистрирована программа для ЭВМ, позволяющая делать расчеты температурных профилей в двухслойных поглотителях при нагреве движущимся источником. Проведены модельные расчеты распределения температуры в двухслойных поглотителях при нагреве движущимся источником, на основе которых рекомендованы оптимальные режимы модифицирующего облучения непрерывным электронным пучком или плазменной струей постоянного тока, обеспечивающие ускорение диффузионных процессов и фазообразования в защитных порошковых покрытиях, нанесенных плазменной струей на стальные подложки. Разработан способ улучшения физико-механических свойств сплавов облучением, подтвержденный получением инновационного патента Республики Казахстан. Структурно-фазовые превращения в модифицируемых материалах, определяемые распределением температуры при облучении, закономерно приводят к улучшению микротвердости и коррозионной стойкости модифицированных облучением по рекомендованным режимам покрытий.

Достоверность полученных в диссертации результатов и обоснованность научных положений подтверждается:

- применением комплекса современных методов структурных исследований (электронной просвечивающей и сканирующей микроскопии с энергодисперсионным анализом, атомно-силовой микроскопии, рентгеноструктурного анализа)
- применением хорошо апробированных методов физического эксперимента;
- корректностью постановки решаемых задач и их физической обоснованностью;
- большим объемом экспериментальных и теоретических данных по параметрам исследуемых микроструктур, их адекватной корреляцией с наблюдаемыми изменениями физико-механических свойств, а также хорошим согласованием с имеющимися многочисленными литературными источниками;
- применением методов математического моделирования физических процессов, протекающих в конденсированных средах
- широкой апробацией полученных данных и выводов исследования на научных конференциях, а также в публикациях в российских и зарубежных научных журналах.

Личный вклад автора состоит:

- в постановке задач, целей исследования и в планировании эксперимента;
- в разработке математической модели и программного обеспечения для расчетов температурных полей в двухслойных металлических поглотителях при нагреве движущимся источником и в проведении численного эксперимента по расчету температурных профилей при облучении;
- в проведении экспериментальных исследований структуры и свойств модифицированных материалов а также в статистической обработке, обобщении и анализе полученных данных по изменению структурно-фазового состава и физико-химических свойств облученных материалов;
- в анализе и в обсуждении полученных результатов, в формулировании выводов диссертации, в апробации результатов на международных конференциях и в публикациях.

Основные положения, выносимые на защиту:

- особенности структурно-фазового состояния, характеризующегося формированием нанозеренной структуры покрытий и выделением упрочняющих наночастиц в процессе распада твердого раствора, и физико-химических свойств порошковых покрытий на основе Ni и Co, нанесенных плазменной струей на стальные подложки;
- результаты расчетов температурных профилей в системе «покрытие-подложка», в зависимости от плотности мощности и скорости движения источника, полученные предложенным в работе методом расчетов по оригинальному алгоритму температурных полей в системе двухслойных металлических поглотителей при нагреве движущимся источником, использованные для выбора оптимальных параметров плазменного и электронного облучения, обеспечивающих заданное температурное распределение при модифицирующей обработке покрытий;

- закономерности эволюции структурно-фазового строения и свойств порошковых покрытий на основе Ni и Co при модифицирующем облучении плазменной струей или электронным пучком постоянного тока, происходящие за счет ускорения процессов диффузии и прерывистого распада твердого раствора при облучении, заключающиеся в увеличении в среднем на 10% объемной доли упрочняющих интерметаллидных фаз пластинчатой морфологии, в уменьшении в среднем на 5% объемной доли оксидов на поверхности покрытия, в увеличении в 1,5-2 раза ширины диффузионной зоны от покрытия к подложке и в формировании однородной микроструктуры покрытия;

- экспериментально установленное улучшение физико-механических свойств покрытий после модификации облучением по рекомендованным режимам, достигаемое за счет структурно-фазовых превращений в модифицируемых материалах, обусловленных распределением температуры при облучении, а именно: повышение микротвердости на 25% и снижение скорости коррозии в морской воде на 10-15%.

Связь работы с научными программами и темами. Диссертационная работа выполнялась в рамках договоров о научном сотрудничестве между ВКГТУ им. Д.Серикбаева и АлтГТУ им. Ползунова. А также в рамках научных проектов:

- финансируемый Национальным агентством технологического развития РК проект «Разработка технологии модификации поверхности облучением для получения многофункциональных наноструктурированных защитных слоев с повышенными эксплуатационными свойствами», № 389, 2012-2014 гг;

- финансируемый по программе целевого бюджетного финансирования РК проект «Разработка научных основ инновационной технологии модификации защитных покрытий электронным и плазменным облучением». 2011-2014 гг;

- финансируемый Комитетом науки МОиН РК (Интеллектуальный потенциал страны. Фундаментальные исследования в области естественных наук) проект «Исследование формирования наноструктур в плазменно-детонационных покрытиях на основе Ni и Co и поиск научно-обоснованных режимов модификации покрытий облучением», 2012-2014 гг.

- финансируемый Комитетом науки МОиН РК по приоритету «Рациональное использование природных ресурсов, переработка сырья и продукции. Фундаментальные научные исследования» (по подприоритету «Теоретические основы получения многофункциональных материалов и покрытий с заданным комплексом свойств») проект «Автоматизированное прецизионное нанесение multifunctionальных систем порошковых покрытий», 2015-2017 гг.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были изложены и обсуждены на следующих международных научных конференциях и симпозиумах: «Ion Implantation and Other Application of Ions and Electrons» ION - 2012, ION - 2014, Польша; 12th International Conference on Plasma Surface Engineering, PSE – 2014, Германия; «New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation», NEET- 2013 и NEET- 2015, Польша; 20th International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (ISMANAM 2013), Италия; «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», Астрахань, Россия, 2012, Алматы, Казахстан, 2013 и Усть-Каменогорск, Казахстан, 2015; 5th International Conference “Radiation

Interaction with Material and Its Use in Technologies 2014”, Литва, « Nanomaterials: Applications and Properties» NAP-2012 и NAP-2013, Украина, 7th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (AIS), Венгрия, 2012; International Congress on Engineering and Information (ICEAI 2013), Таиланд, 2013; «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики», Тольятти, Россия, 2014, «Зеленая экономика – будущее человечества», ВКГТУ, Казахстан, 2014, 5th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress & Exhibition (APMAS 2015), Турция, 2015.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 26 работ, из них 1 авторское свидетельство на программу для ЭВМ и 1 авторское свидетельство на изобретение (инновационный патент Республики Казахстан), 6 журнальных статей, из которых 5 изданы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 11 статей в сборниках Международных конференций, 7 тезисов.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и 2-ух приложений (копии авторских свидетельств). Диссертация изложена на 159 страницах и включает 66 рисунков и 7 таблиц. Список использованных источников включает 134 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, указана цель исследования и отмечена новизна и практическая значимость работы, Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе кратко рассмотрены основные технологические процессы термического осаждения плазмой защитных покрытий на подложки, дана их сравнительная характеристика, указаны достоинства и недостатки существующих методов с точки зрения формирования покрытий с заданной структурой и прогнозируемыми эксплуатационными свойствами. Сделан обзор работ, посвященных вопросу о формировании наноструктур и их свойствах в материалах покрытий, полученных плазменными методами, а также работ, посвященных моделированию физических процессов, идущих в материалах защитных покрытий при модифицирующей обработке облучением. Рассмотрены фазовые диаграммы состояния ряда металлических систем, чтобы сделать предположения о влиянии нагрева при облучении на фазовые превращения в материалах покрытий. На основе анализа литературных данных и с учетом актуальности применения комбинированных методов создания защитных покрытий из порошковых сплавов сформулирована цель и задачи диссертационного исследования.

Во втором разделе описаны материалы исследования, приведены классификация, общая техническая характеристика и назначение исследуемых сплавов и стали, выбраны и описаны методы эксперимента, дано описание установки для модификации покрытий плазмой и описание режимов нанесения покрытий из порошковых сплавов ПГ-19Н-01 и АН-35 плазменной струей на подложки из конструкционной стали Ст3 и их модификации.

Исследования методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) проводили на JEM-2100 со STEM-системой (JEOL Ltd., Япония) и с системой энергодисперсионного микро(нано)анализа INCA Energy TEM 350 (OXFORD Instruments, Великобритания). Исследовали фольги, протравленные аргонными

пучками в вакууме на установке прецизионной ионной полировки PIPS (Gatan, США). Структурные и аналитические исследования покрытий и подложек проводили также методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на JSM-6390LV («JEOL», Япония) с приставкой энергодисперсионного анализа INCA ENERGY (OXFORD Instruments, Великобритания). Топографию поверхности покрытий исследовали на атомно-силовых микроскопах JSPM-5200 («JEOL», Япония) и NT-206 (Белоруссия), оценивая шероховатость поверхности Ra . Металлографическое исследование образцов всех исследуемых материалов проводили на инвертированном фотомикроскопе отраженного света Neophot-21 («Carl Zeiss», Германия) и на металлографическом микроскопе МИМ-7. Использовали электролитическое травление образцов. Для изучения структурно-фазового состава покрытий и подложек применяли рентгеновский дифрактометр X'Pert PRO («PANalytical», Нидерланды). Испытания на микротвердость всех образцов проводили на приборе ПМТ-3. Для проведения коррозионных испытаний использовали потенциостатический метод, оценивая скорость коррозии в морской воде. Определяли потенциал коррозии $\varphi_{\text{корр}}$ (мВ) и ток коррозии $i_{\text{кор}}$ (мА), потенциал пассивации $\varphi_{\text{пас}}$ (мВ) и ток пассивации $i_{\text{пас}}$ (мА), а так же скорость коррозии $v_{\text{корр}}$ (мм/год). Для вычисления скорости коррозии определяли время испытания и потерю массы на единицу площади поверхности Δm (кг/м²),

В третьем разделе обоснована физико-математическая постановка задачи, сделано описание модели и алгоритмов решения задачи нахождения температурных полей при облучении покрытий движущимся источником облучения. В процессе радиационной обработки покрытий достигаются высокие температуры поверхности покрытия (оплавление поверхности покрытия – часто возникающее явление), причем температура подложки на сравнительно небольшой глубине повышается незначительно. Так как теплофизические характеристики металлов, такие, как коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость, существенно зависят от температуры, адекватное моделирование процессов теплопереноса при обработке покрытий излучением приводит к решению нестационарной задачи теории нелинейной теплопроводности. Задачи нелинейной теории теплопроводности решаются почти исключительно численными методами, ввиду крайней сложности нахождения аналитического решения возникающих задач [9]. Математически строгое обоснование корректности приближенных методов, применяемых для решения задач нелинейной теплопроводности, в большинстве случаев отсутствует, потому основным критерием пригодности того или иного приближенного метода является его проверка на модельных задачах, решенных классическими методами линейной теории теплопроводности. Проверка на модельных задачах необходима также в процессе разработки программного обеспечения, предназначенного для моделирования процессов теплопереноса. Экспериментальное подтверждение правильности расчетов в данном случае сопряжено с большими техническими трудностями, поэтому решение данной модельной задачи классическими методами линейной теплопроводности, было необходимым этапом разработки полной модели поведения материала при нагреве движущимся источником излучения.

В данном разделе последовательно излагаются сначала разработанный численный метод для решения задачи по расчетам температурных профилей в двухслойных поглотителях с постоянными, а затем с переменными

теплофизическими коэффициентами. Рассмотрена задача о нагревании образца, представляющего собой металлическую пластину (подложку) с нанесенным на ее поверхность слоем покрытия, движущимся осесимметричным источником тепла (рисунок 1). Выбор материала и толщины слоев-поглотителей основан на разработанной ранее на основе экспериментов схеме строения защитных порошковых покрытий, нанесенных плазменной струей на стальные подложки, опубликованной в [2].

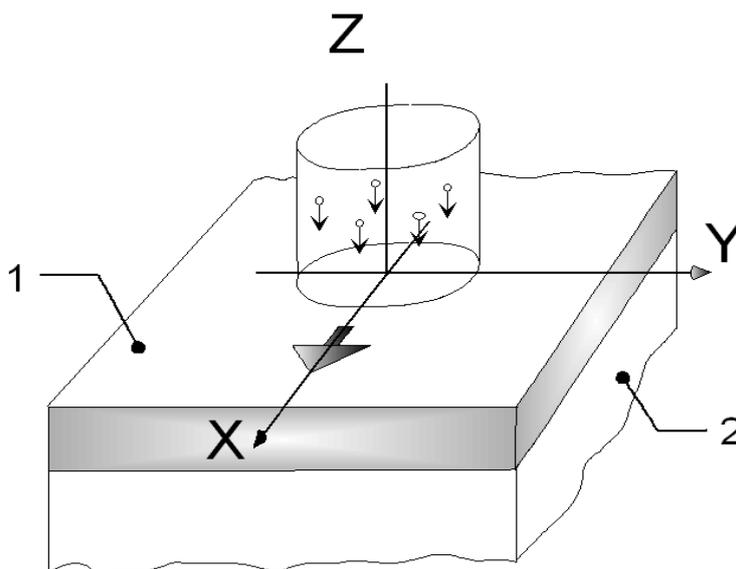


Рисунок 1 - Схематическое изображение движущегося источник тепла, где 1-покрытие; 2-подложка; XYZ -движущаяся декартова система координат

Численными методами решено уравнение теплопроводности, согласно разработанному алгоритму разработана программа вычислений. Проведены модельные расчеты распределения температуры в двухслойных поглотителях при нагреве движущимся источником. На рисунках 2 и 3 приводятся скриншоты, сделанные во время работы программы, реализующей разработанный метод расчета теплового поля движущегося источника

Анализируя полученные карты изолиний температурного поля на границе покрытия с подложкой, выбрали режимы дополнительного облучения покрытий электронным пучком или плазменной струей, приводящие к оплавлению поверхностного слоя покрытия, без проплавления покрытия на всю его глубину. Предполагали таким образом улучшить стойкость модифицированных покрытий к коррозии за счет уменьшения шероховатости поверхности при оплавлении и улучшения адгезии покрытия к подложке за счет ускорения диффузионных процессов при облучении. Особенно важным было обеспечить достаточно высокие температуры (порядка 400°C) на границе раздела «покрытие-подложка», чтобы обеспечить выделение упрочняющих интерметаллидных фаз, и в то же время выдержку при данной температуре порядка нескольких секунд, что, с одной стороны, обеспечивает энергосбережение, позволяя заменить длительный объемный нагрев материала на локальное краткосрочное температурное воздействие, с другой стороны, позволяет избежать нежелательных процессов вторичной рекристаллизации и сохранить нанокристаллическую структуру матрицы.

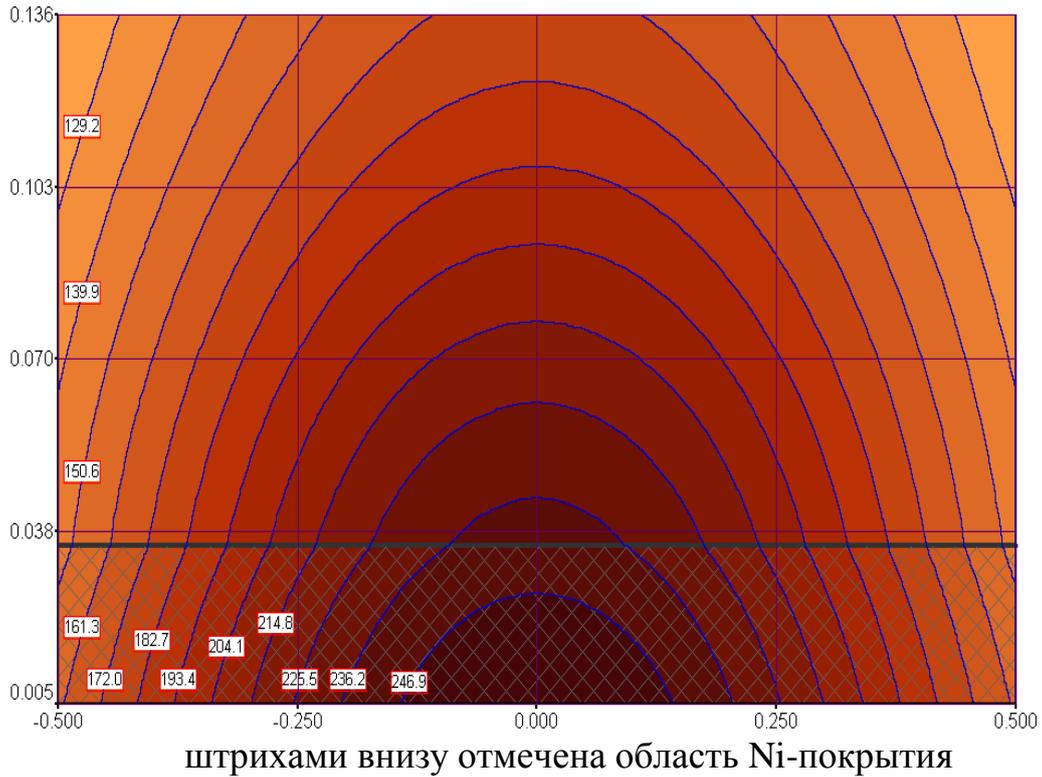


Рисунок 2 - Карта изолиний температурного поля на границе Ni-покрытие-Fe-подложка в разрезе плоскости, перпендикулярной поверхности образца, вектор скорости перемещения пучка параллелен плоскости среза

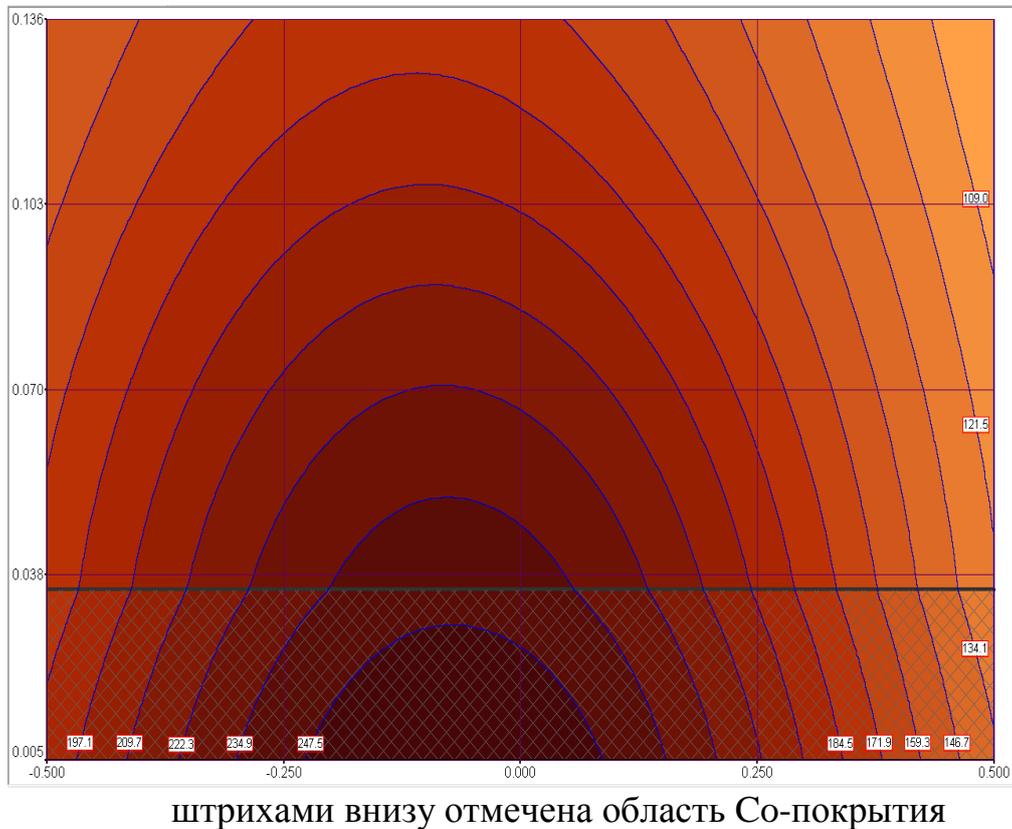


Рисунок 3 - Карта изолиний температурного поля на границе Co-покрытие-Fe-подложка в разрезе плоскости, перпендикулярной поверхности образца, вектор скорости перемещения пучка параллелен плоскости среза

Проведена модифицирующая обработка образцов с покрытиями по расчетным режимам, соответственно: облучение в защитной среде аргона образцов с покрытием из кобальтового порошка АН-35 и никелевого порошка ПГ-19Н-01 плазменной струей постоянного тока на установке «МПН-004» с параметрами: плотность мощности плазменной струи на образце $1,9 \cdot 10^7$ Вт/м², скорость перемещения плазменной струи по образцу 0,006 м/с; облучение образцов с покрытием из ПГ-19Н-01 в вакууме (не хуже 4 Па), электронным пучком постоянного тока на источнике «У-212» с ускоряющим напряжением 30 кВ в непрерывном режиме, плотность мощности электронного пучка на образце $5 \cdot 10^6$ Вт/м², скорость движения пучка электронов по образцу 0,004 м/с.

В четвертом разделе представлены результаты исследований структурно-фазового состава и свойств покрытий на основе Ni (ПГ-19Н-01) и Co (АН-35) нанесенных плазменной струей на стальные подложки и подложки СтЗ, а так же морфологии поверхности покрытий до и после их модификации облучением по рекомендованным на основе моделирования режимам.

Экспериментально установлены особенности структурно-фазового строения и свойств покрытий и подложки после нанесения порошков покрытий плазменной струей на подложку. Для покрытий характерно формирование нанозеренной ГЦК-матрицы покрытия с размерами нанозерен порядка 50 нм (рисунок 4) и выделение упрочняющих наноразмерных интерметаллидных фаз пластинчатой морфологии CrNi₃ в сплаве из ПГ-19Н-01 или Co_{0,8}Cr_{0,2} в сплаве из АН-35 (рисунок 5).

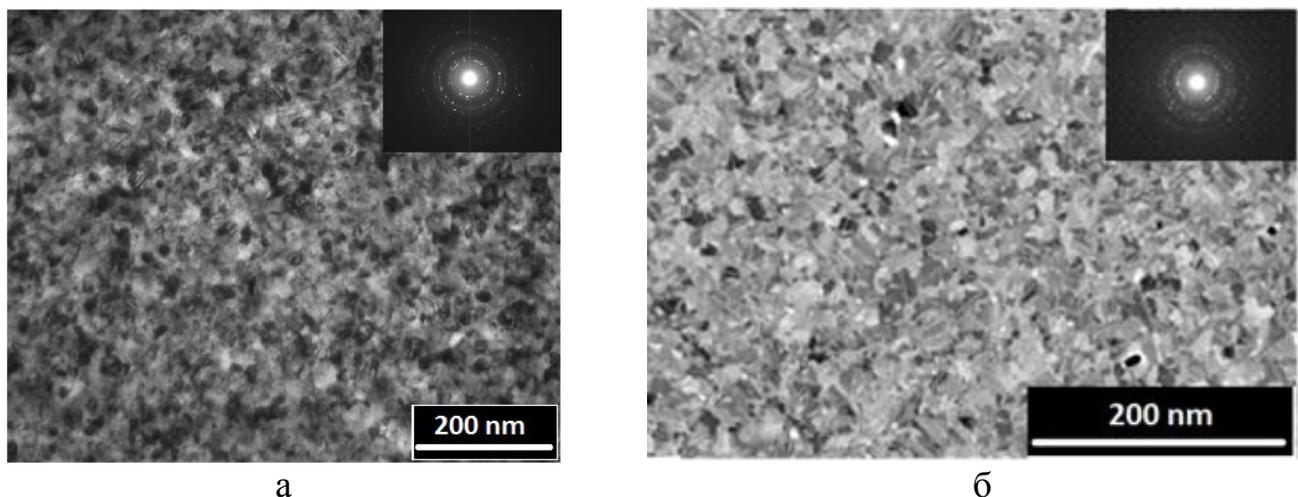


Рисунок 4 - ПЭМ-изображения матрицы покрытия из ПГ-19Н-01(а) и из АН-35 с соответствующими микроэлектроннограммами

Объемные доли данных фаз в обоих покрытиях составляют около 15%. Для микроструктуры подложки в граничной с покрытием области характерно наличие двойников в зернах, что свидетельствует о деформации подложки за счет ударного воздействия частиц порошка покрытия при нанесении, а также о процессах снятия напряженного состояния при кратковременном тепловом отпуске при остывании системы «покрытие-подложка» на воздухе по завершении воздействия плазменной струи с порошком покрытия (рисунок 6). Характерным для приграничной области в подложке является также формирование мелкозернистой структуры из зерен

микронных размеров, измельчение зерен также обусловлено ударным и тепловым воздействием плазменной струи в процессе нанесения покрытия.

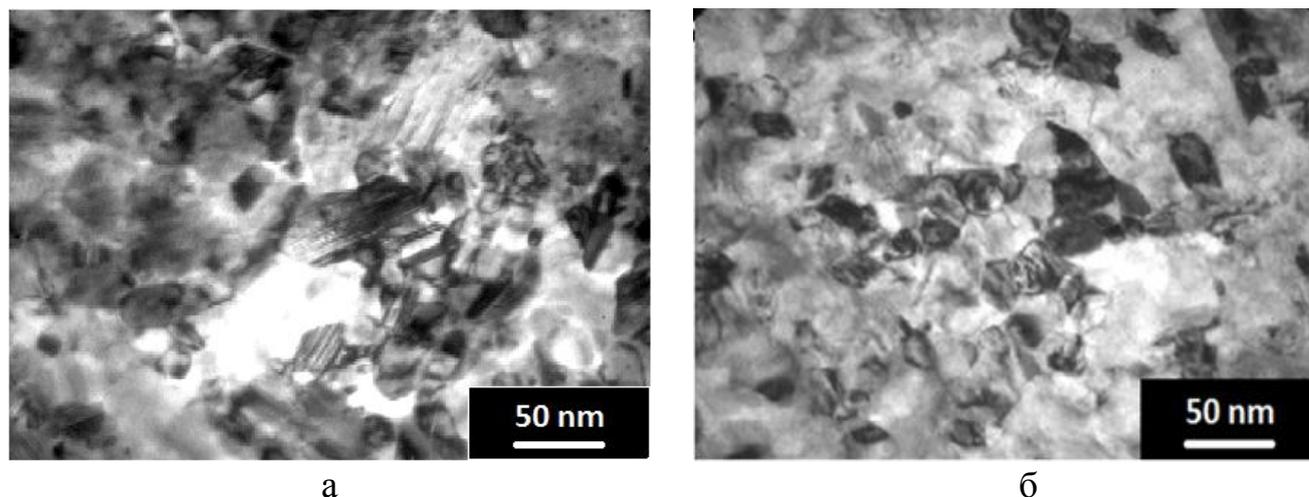


Рисунок 5 - ПЭМ - изображения частиц пластинчатой морфологии в покрытиях из ПГ-19Н-01(а) и из АН-35(б)

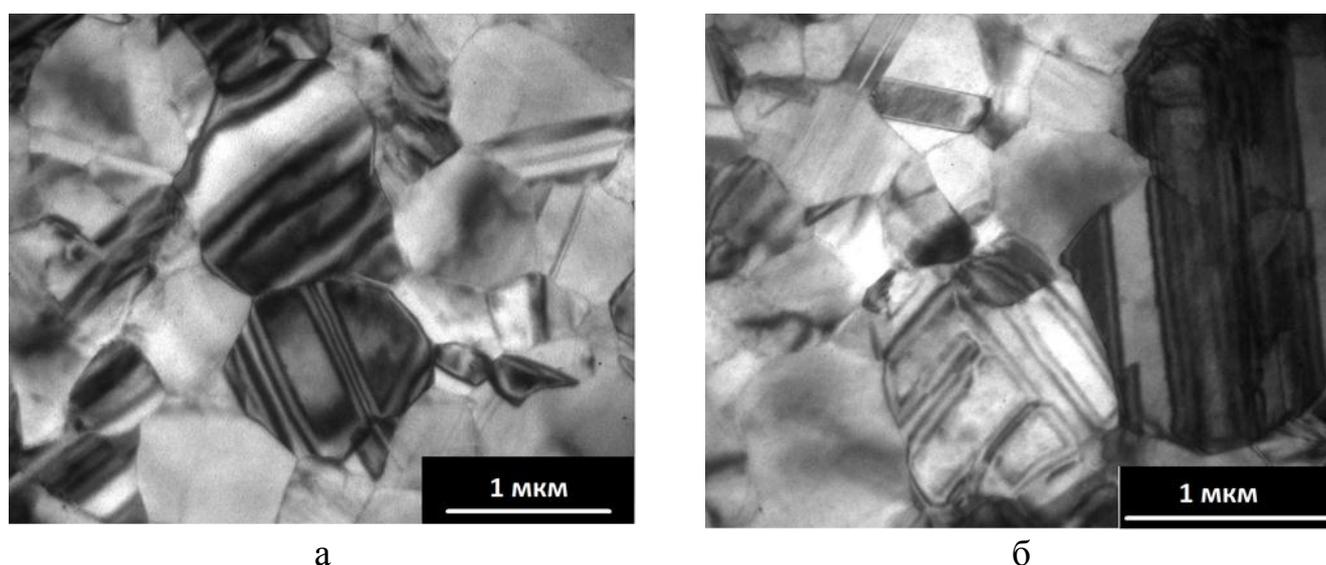


Рисунок 6 - ПЭМ-изображения микроструктур граничных слоев подложки из Ст3 с покрытием из ПГ-19Н-01 (а) и из АН -35 (б)

Характерно формирование переходной (диффузионной) зоны от покрытий к подложке шириной порядка 100 мкм. В диффузионной зоне повышено содержание интерметаллидных фаз на основе основных компонентов покрытий и подложки, микротвердость данной области повышена по сравнению с подложкой. В целом микротвердость убывает по величине по направлению от поверхности покрытия к подложке, коррозионная стойкость Со-покрытий недостаточно высокая, а у Ni-покрытий неудовлетворительная, они разрушаются путем отслаивания при испытаниях в морской воде. Покрытия нуждаются в дополнительной обработке облучением для изменения их структурно-фазового состава и улучшения свойств.

Основные результаты, подтверждающие факт формирования наночастиц заданной морфологии и состава, а также факт увеличения их объемной доли в материале при облучении покрытий плазменной струей получены методами ПЭМ.

Установлено, что после облучения тип и параметры решетки поликристаллической ГЦК-матрицы не меняются (рисунок 7), но по данным рентгеноструктурного анализа объемная доля твердого раствора увеличивается в среднем на 10%, в основном за счет уменьшения объемной доли оксидов в покрытиях.

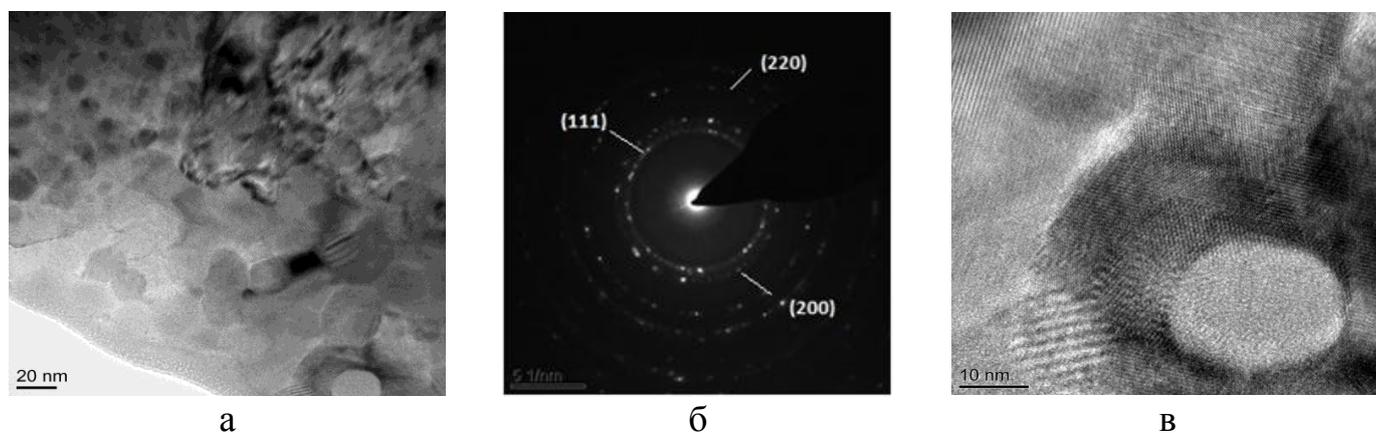


Рисунок 7 - Поликристаллическая матрица покрытия из ПГ-19Н-01, типичная квазикольцевая микроэлектроннограмма данного участка и вид нанозерен матрицы на большом увеличении

Неизменным остается и тип решетки интерметаллидных выделений. На рисунках 8 и 9 показан общий вид выделяющихся наночастиц пластинчатой морфологии из матрицы покрытий и соответствующие микроэлектроннограммы, результаты расшифровки которых однозначно указывают на то, что из поликристаллической матрицы кобальтового покрытия из АН-35 с ГЦК-структурой (так называемая аустенитная структура сплава) выделяются наноразмерные стержни интерметаллидной фазы $\text{Co}_{0.8}\text{Cr}_{0.2}$ с гексагональной структурой (рисунок 8), а из поликристаллической матрицы никелевого покрытия ПГ-19Н-01 наноразмерные ламели интерметаллидной фазы CrNi_3 с ГЦК структурой (рисунок 5). На спектрах фольг отмечаются пики железа (рисунок 9), предположительно проникшего в покрытие из подложки за счет ускорения диффузионных процессов при облучении

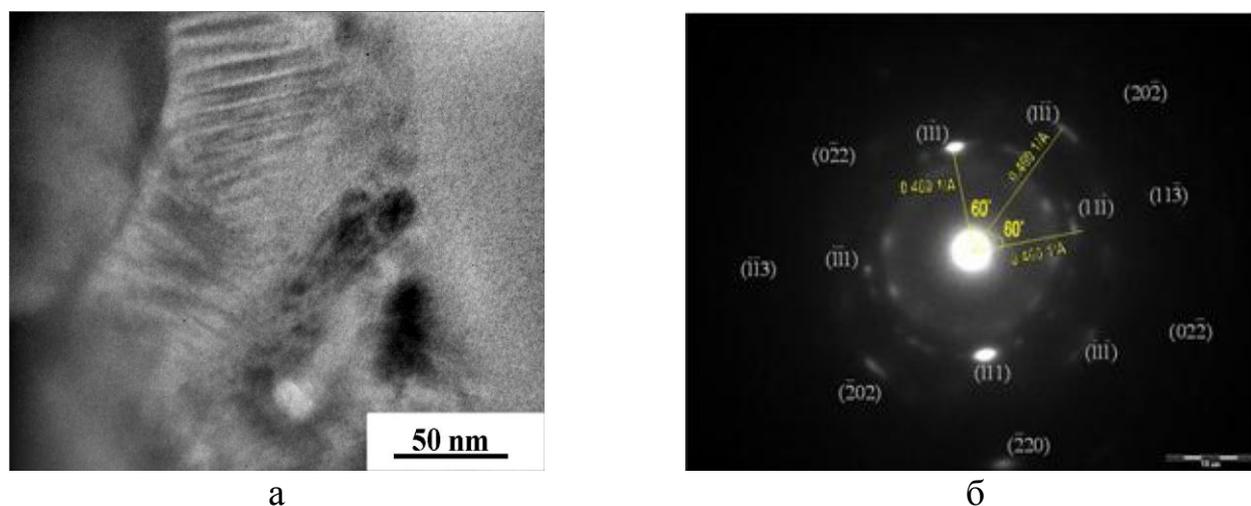


Рисунок 8 –Общий вид наноструктуры модифицированного покрытия из АН-35 с микроэлектроннограммой от участка с наночастицами и индексированием рефлексов $\text{Co}_{0.8}\text{Cr}_{0.2}$ -фазы

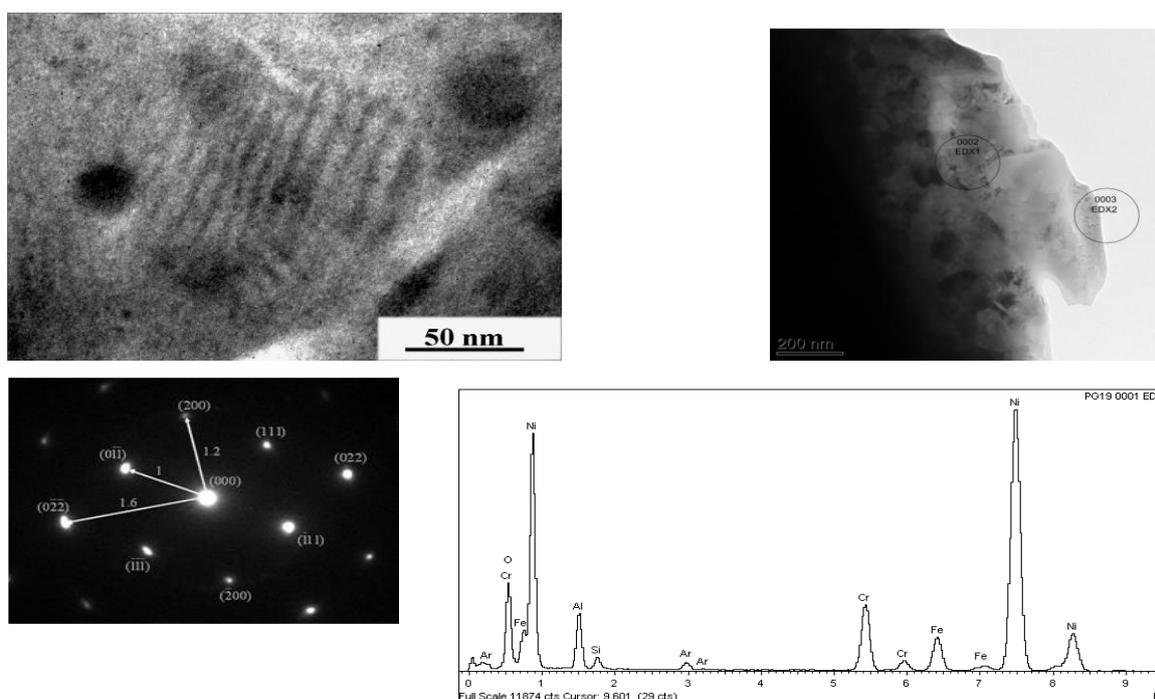


Рисунок 9 - Вид ламелей выделяющейся в никелевом покрытии фазы CrNi_3 и расшифровка соответствующей точечной микроэлектроннограммы, энергетический спектр участка и его ПЭМ-изображение, на котором кружком отмечено место съемки спектра

Определена объемная доля данных наночастиц, она составляет 25% в покрытии на основе Co и 23% в покрытии на основе Ni, что в среднем на 10-8% выше, чем содержание данных фаз в тех же покрытиях до модификации. Эти данные ПЭМ подкреплены данными рентгеноструктурного анализа.

Данные рентгеноструктурного анализа свидетельствуют также об увеличении в облученных покрытиях содержания фаз с преобладанием в их составе основного элемента подложки (Fe), а в подложке – о наличии структур с преобладанием в их составе основного элемента покрытия (Co или Ni). Анализ областей у границы покрытий и подложек, проведенный методами СЭМ с микроанализом и построением профиля распределения элементов, также подтверждает ускорение диффузионных процессов при облучении (рисунок 10). Отчетливо видны области взаимного проникновения элементов подложки и покрытия. Видно, что в покрытии сформирована однородная мелкозернистая структура с зернами, слегка вытянутыми в направлении теплового потока. Поликристаллические нанозернистые структуры, видимые на ПЭМ-изображениях образцов покрытий, представляют собой наноразмерные субзерна внутри данных зерен с диаметром менее 1 мкм. Граница покрытия с подложкой однородная, без пор и трещин, что также свидетельствует об улучшении адгезии покрытия к подложке при облучении. Карты распределения элементов, полученные методом СЭМ с энергодисперсионным анализом, однозначно подтверждают взаимное проникновение элементов покрытия. Так как глубина данного проникновения существенная, то в данном случае можно утверждать, что мы наблюдаем развитие радиационно-стимулированной диффузии.

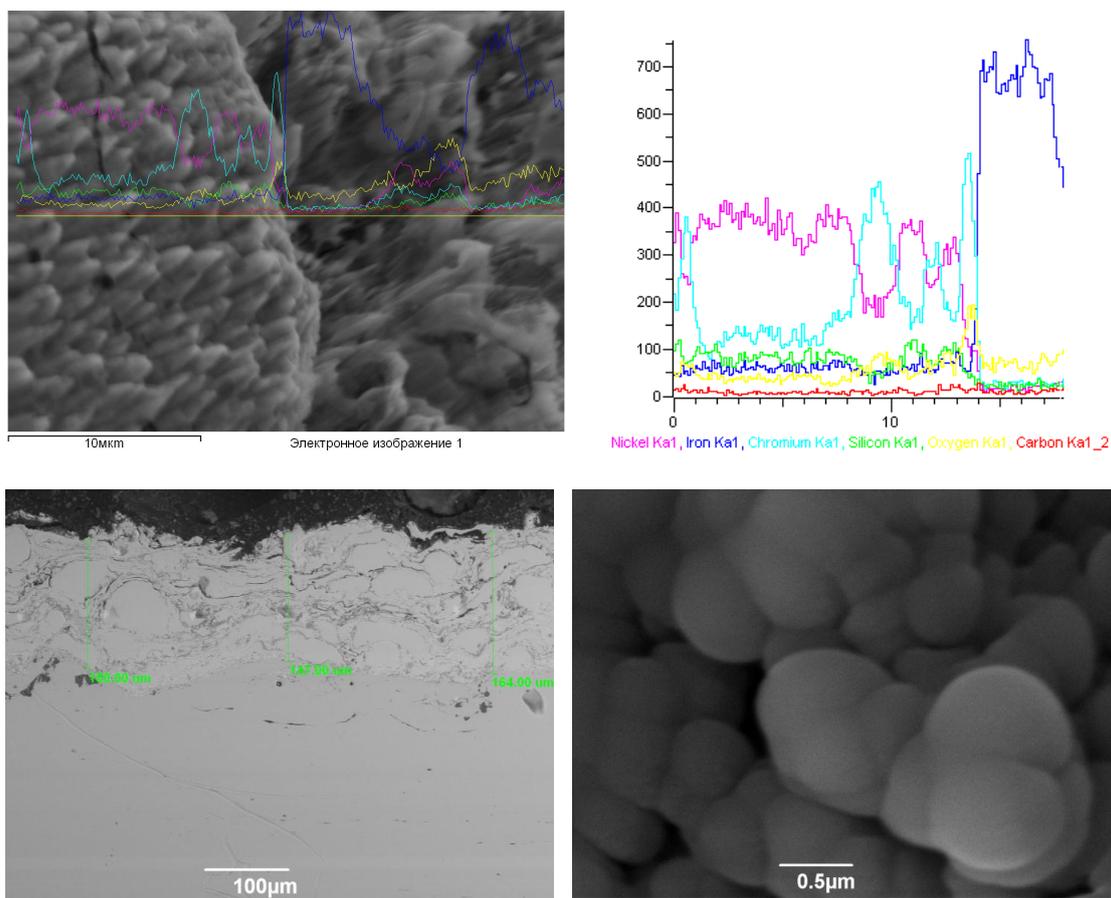


Рисунок 10 СЭМ-изображение микроструктуры модифицированного покрытия из ПГ-19Н-01 с линией профиля распределения элементов и вид границы покрытия с подложкой

Значения микротвердости покрытий неоднородны по глубине от поверхности, в среднем значения микротвердости увеличиваются на 25% после модификации облучением, а ширина переходной (диффузионной) зоны между покрытием и подложкой увеличивается в 2 раза и достигает в среднем 200 мкм после облучения: 100 мкм в покрытии и 100 мкм в подложке) (рисунок 11).

Так же, как в случае модификации плазмой, облучение электронным пучком приводит к увеличению объемной доли упрочняющих наноразмерных интерметаллидов в среднем на 10% для Ni-покрытий. За счет достижения на поверхности покрытия высоких температур при облучении, происходит оплавление шероховатостей на поверхности покрытия. Уровень шероховатости покрытий после облучения снижается в среднем в 2 раза при облучении плазменной струей (рисунок 12 и рисунок 13), и в среднем в 3 раза при облучении электронным пучком.

Стойкость модифицированных покрытий к коррозии в морской воде увеличивается за счет улучшения адгезии покрытия к подложке в ходе радиационно-стимулированной диффузии (таблица 1). Исходное покрытие из ПГ-19Н-01 выказывало неудовлетворительную стойкость к коррозии (ржавело и отслаивалось), поэтому результаты его испытаний не включены в таблицу 1.

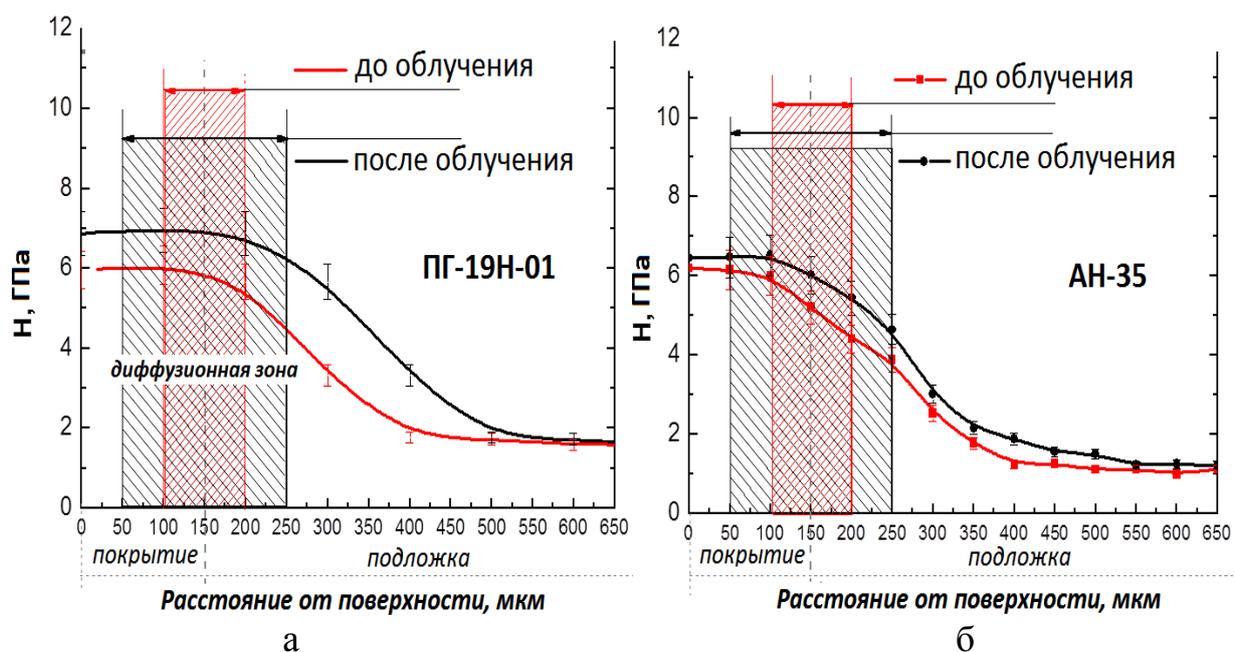


Рисунок 11 – Графики распределения по глубине от поверхности микротвердости покрытий из ПГ-19Н-01 (а) и АН-35 (б) до (нижние кривые) и после модификации плазменным облучением (верхние кривые).

Проведено сравнение результатов модификации покрытий на основе Ni плазмой и электронным пучком. Установлено, что типы формирующихся в покрытиях микро и наноструктур при модифицирующей обработке плазменной струей или электронным пучком никелевых покрытий сходные, повышение микротвердости достигается за счет увеличения объемной доли выделяющихся из поликристаллического твердого раствора с ГЦК-структурой интерметаллидных наноразмерных частиц пластинчатой морфологии также с ГЦК-структурой.

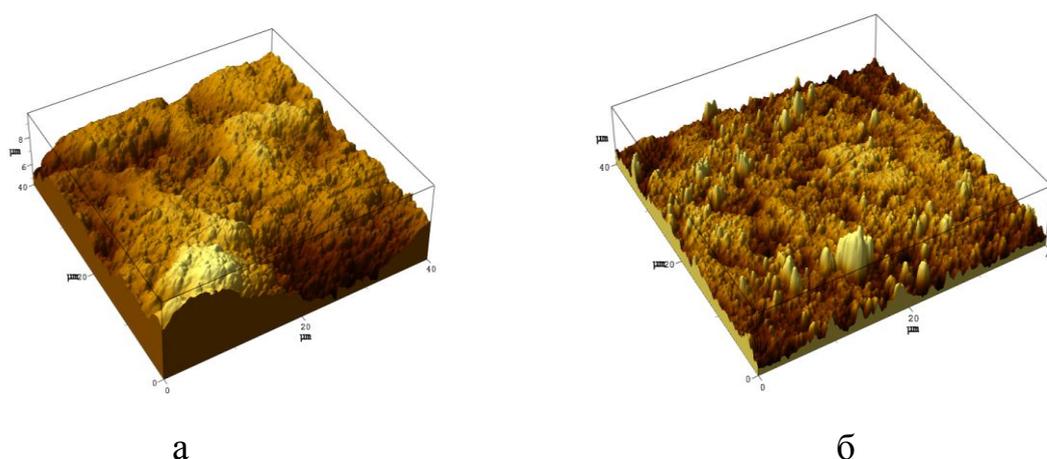


Рисунок 12 - Топография поверхности плазменно-детонационных покрытий из ПГ-19Н-01 до ($R_a = 0,1072 \mu\text{m}$) (а) и после (б) облучения плазмой ($R_a = 0,0535 \mu\text{m}$)

В обоих случаях отмечается проникновение Ni из покрытия в подложку, а Fe из подложки в покрытие. Этот эффект более выражен в случае плазменного облучения, когда глубина взаимного проникновения элементов (диффузионная зона) достигает 200 мкм (при электронном облучении пучком постоянного тока она не превышает 100 мкм). При облучении электронным пучком за счет оплавления поверхности покрытия достигается более значительное снижение ее шероховатости, до 3-х крат (при плазменном облучении не более 2-х крат) и более заметное проплавление порошковых частиц покрытия (гомогенизация микроструктуры), что сопровождается заметным ростом стойкости к коррозии, лучше, чем в случае модификации плазмой.

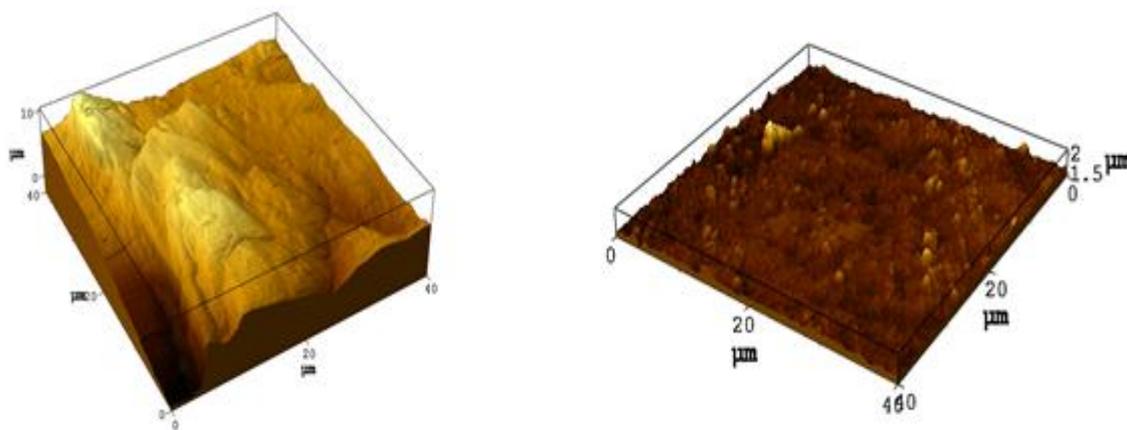


Рисунок 13 - Топография поверхности плазменно-детонационных покрытий из АН-35 01 до ($Ra = 0,20 \mu\text{m}$) и после облучения плазмой ($Ra = 0,10 \mu\text{m}$)

Таблица 1 - Результаты тестов на стойкость к коррозии в 3 %- м растворе NaCl

Материал	Потенциал коррозии $\varphi_{\text{корр}}$ (мВ)	Ток коррозии $i_{\text{кор}}$ (мА)	Ток пассивации $i_{\text{пас}}$ (мА)	Потенциал пассивации $\varphi_{\text{пас}}$ (мВ)	Скорость коррозии $v_{\text{корр}}$ (мм/год)
исходное покрытие из АН-35	-380	2,25	1,20	1190	2,9
покрытие из АН-35 после модификации плазменной струей	-320	0,64	1,05	1175	2,0
Покрытие из ПГ-19Н-01 после модификации плазменной струей	-340	0,89	1,00	1170	2,2
Покрытие из ПГ-19Н-01 после модификации электронным пучком	-315	0,92	0,80	1090	1,9

Таким образом, улучшение эксплуатационных характеристик порошковых защитных покрытий на основе Ni более существенно в случае их модифицирующей обработки электронным пучком в вакууме. Однако, такой вид воздействия более дорогостоящий, так как требует поддержания вакуума в определенном объеме и не пригоден для обработки крупногабаритных деталей с защитными покрытиями. Поэтому его можно рекомендовать для модификации покрытий на деталях инструментов небольших размеров и ответственного назначения (медицинские инструменты и имплантаты, прецизионное приборостроение и проч.), тогда как способ плазменной обработки поверхности в воздушной среде может быть реализован в промышленных масштабах для нанесения и модификации порошковых покрытий на крупногабаритные конструкции (защита стен трубо- и нефтепроводов, упрочнение горнодобывающего инструмента, защита лопаток турбин атомных и тепловых электростанций и т.п.). На основе экспериментальных и теоретических исследований, описанных в работе, был разработан способ модификации электронным пучком структуры и свойств железо - никелевого сплава и подана заявка на выдачу инновационного патента РК на изобретение.

В целом, анализируя совокупность результатов исследования структурно-фазового состава и свойств покрытий до и после модификации, можно отметить, что специфические особенности данных покрытий, заключающиеся в их упрочнении за счет выделения наноразмерных интерметаллидных фаз и в формировании переходной (диффузионной) зоны от покрытий к подложке сохраняются в модифицированных покрытиях. Дополнительное облучение приводит к эволюции структурно-фазового состава, заключающейся в росте объемной доли упрочняющих частиц за счет прерывистого распада твердого раствора матрицы, в увеличении ширины диффузионной зоны за счет радиационно-стимулированной диффузии, в уменьшении объемной доли оксидов на поверхности покрытий и в сглаживании ее шероховатости. Происходит формирование однородной мелкозернистой структуры в покрытиях и наблюдается улучшение микротвердости и коррозионной стойкости.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1) Экспериментально установлены особенности структурно-фазового строения и свойств порошковых покрытий на основе Ni (ПГ-19Н-01) и Co (АН-35), нанесенных плазменной струей на стальные подложки. Для них характерно формирование нанозернистой ГЦК-матрицы покрытия с размерами нанозерен порядка 50 нм и выделение упрочняющих наноразмерных интерметаллидных фаз пластинчатой морфологии CrNi_3 или $\text{Co}_{0.8}\text{Cr}_{0.2}$ соответственно (объемная доля данных фаз в покрытиях составляет около 15%), а также формирование переходной (диффузионной) зоны от покрытий к подложке. В диффузионной зоне повышено содержание интерметаллидных фаз на основе основных компонентов покрытий и подложки, микротвердость данной зоны выше, чем микротвердость подложки. В целом, микротвердость убывает по величине по направлению от поверхности покрытия к подложке, коррозионная стойкость покрытий в морской воде неудовлетворительная. Покрытия нуждаются в модификации облучением для ускорения в них процессов диффузии и распада твердого раствора с формированием упрочняющего нанокompозита, чтобы улучшить прочность и адгезию к подложке, соответственно, улучшить стойкость к коррозии.

2) Разработаны методы расчетов температурных полей в системе двухслойных металлических поглотителей при нагреве движущимся источником излучения, а именно: разработана математическая модель распределения температурных полей в двухслойных металлических поглотителях при нагреве движущимся источником и оригинальный алгоритм вычисления температурных полей в зависимости от заданной плотности мощности и скорости движения источника, чтобы прогнозировать температурные профили в материалах при разных режимах радиационного воздействия. Разработана и реализована программа вычислений по данному алгоритму, получено свидетельство интеллектуальной собственности о государственной регистрации на объект авторского права (программа для ЭВМ).

3) На основании численных экспериментов по расчету температурных профилей в системе «покрытие-подложка» при нагреве движущимся источником облучения и на основе сравнения расчетных температурных профилей с фазовыми диаграммами систем, включающими основные компоненты исследуемых покрытий (Ni –Cr или Co–Cr), рекомендованы оптимальные режимы модифицирующего облучения, обеспечивающие энергосбережение и желаемые структурно-фазовые превращения в модифицируемых в материалах.

4) Выявлены закономерности формирования наноразмерных интерметаллидов в процессе нанесения порошковых Ni или Co покрытий плазменной струей на стальные подложки и при модифицирующем облучении, а именно: при достижении расчетных температур, в приближенном соответствии с фазовыми диаграммами состояния, в покрытиях начинается распад твердого раствора с выделением наноразмерных фаз пластинчатой морфологии CrNi_3 с ГЦК-типом решетки в Ni-покрытиях или $\text{Co}_{0,8}\text{Cr}_{0,2}$ с гексагональной кристаллической решеткой в Co-покрытиях, с сохранением обедненного твердого раствора матрицы с прежней структурой ГЦК, то есть наблюдается прерывистый распад твердого раствора покрытий, ускоренный за счет радиационно-стимулированной диффузии.

5) На основании экспериментальных исследований структурно-фазового состава и ряда физико-химических свойств модифицированных облучением по расчетным режимам покрытий установлены закономерности эволюции структурно-фазового строения и свойств порошковых покрытий на основе Ni и Co при модифицирующем облучении плазменной струей или электронным пучком постоянного тока, происходящие за счет ускорения процессов диффузии и прерывистого распада твердого раствора при облучении, заключающиеся в увеличении в среднем на 10% объемной доли упрочняющих интерметаллидных фаз пластинчатой морфологии CrNi_3 или $\text{Co}_{0,8}\text{Cr}_{0,2}$ соответственно и уменьшении в среднем на 5% объемной доли оксидов на поверхности покрытия и в снижении в 2-3 раза шероховатости поверхности покрытий, в увеличении в 1,5-2 раза ширины диффузионной зоны от покрытия к подложке и в формировании однородной микроструктуры покрытия.

6) Экспериментально установлено улучшение физико-механических свойств покрытий после модификации облучением по рекомендованным режимам, а именно: повышение микротвердости на 25% и снижение скорости коррозии в морской воде на 10-15%. Улучшение свойств достигается за счет структурно-

фазовых превращений в модифицируемых материалах, обусловленных распределением температуры при облучении. Получено авторское свидетельство на способ модификации железо-никелевого сплава электронным облучением.

7) На основании сравнительного анализа влияния двух типов высокоэнергетического воздействия на структурно-фазовое состояние и свойства никелевых покрытий сделано заключение, что типы формирующихся в них микро и наноструктур при модифицирующей обработке плазменной струей в воздухе или электронным пучком в вакууме сходные, повышение микротвердости достигается за счет увеличения объемной доли выделяющихся из поликристаллической матрицы интерметаллидных наноразмерных частиц пластинчатой морфологии, в обоих случаях отмечается проникновение Ni из покрытия в подложку, а Fe из подложки в покрытие. При облучении электронным пучком за счет оплавления поверхности покрытия достигается более значительное снижение ее шероховатости, до 3-х крат (при плазменном облучении не более 2-х крат) и более заметное проплавление порошковых частиц покрытия (гомогенизация микроструктуры), что сопровождается заметным ростом стойкости к коррозии, лучше, чем в случае модификации плазмой. Таким образом, улучшение эксплуатационных характеристик порошковых защитных покрытий на основе Ni более существенно в случае их модифицирующей обработки электронным пучком в вакууме.

8) На основании исследования даны научно-обоснованные практические рекомендации по выбору типа и режимов модифицирующего облучения, чтобы обеспечить формирование заданных структурно-фазовых состояний в покрытиях на основе Ni и Co на стальных подложках и, соответственно, обеспечить улучшение их физико-химических свойств. Рекомендованы следующие оптимальные режимы модифицирующего облучения: для покрытий из кобальтового порошка АН-35 и никелевого порошка ПГ-19Н-01 на подложке из стали Ст3 - облучение в среде аргона плазменной струей постоянного тока с плотностью мощности на образце $1,9 \cdot 10^7$ Вт/м², скорость перемещения плазменной струи по образцу 0,006 м/с; для покрытий из ПГ-19Н-01 на подложке из стали Ст3 - облучение в вакууме (не хуже 4 Па), электронным пучком постоянного тока с плотностью мощности на образце $5 \cdot 10^6$ Вт/м², скорость перемещения электронного пучка по образцу 0,004 м/с. Электронное облучение в вакууме рекомендуется для модификации покрытий на деталях инструментов небольших размеров и ответственного назначения (медицинские инструменты и имплантаты, прецизионное приборостроение). Способ плазменной обработки поверхности может быть реализован в промышленных масштабах для нанесения и модификации порошковых покрытий при восстановлении изношенных деталей двигателей, (поршни, головки цилиндров), поврежденных коррозией эмалей или стен трубо- и нефтепроводов, упрочнения сверл и т.д.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Алонцева Д.Л., Красавин А.Л., Погребняк А.Д., Рахметуллина С.Ж., Русакова А.В. Модификация электронным облучением структурно – фазового состояния и свойств плазменно – детонационных покрытий на основе Ni-Cr //Перспективные материалы, 2013, № 1. - С.5 – 12
2. Alontseva D., Krasavin A., Pogrebnyak A., Russakova A. Modification of Ni -Based Plasma Detonation Coatings by a Low-Energy DC E-beam// Acta Physica Polonica A, Vol. 123, No 5, 2013. - P.867-870
3. Алонцева Д.Л., Красавин А.Л., Прохоренкова Н.В. Математическое моделирование процессов формирования температурных профилей в двухслойных металлических материалах при нагреве движущимся источником излучения// Вычислительные технологии, Часть I, 2013. – С. 42-50
4. Alontseva, D., Krasavin, A., Kolesnikova T., Russakova, A. Modeling of Processes Taking Place during Powder Coating Treatment by an Electron Beam or a Plasma Jet// Acta Physica Polonica A Vol. 125, No. 6, 2014. - P. 1275-1279
5. Alontseva, D., Krasavin, A., Russakova, A., Kolesnikova T., Bektasova G. Effect of Irradiation with DC Plasma Jet on the Structure Phase Compositions and Properties of Powder Ni and Co – based Coatings//Materials Science (Medžiagotyra, ISSN 1392–1320), Vol. 22, 2016 - в печати

Авторские свидетельства и патенты

6. Красавин А.Л., Алонцева Д.Л., Денисова Н.Ф. Свидетельство ИС 0010558 о государственной регистрации на объект авторского права под названием «Расчеты температурных профилей в двухслойных поглотителях с постоянными теплофизическими коэффициентами при нагреве движущимся источником» (программа для ЭВМ), запись в реестре № 1151 от 20 августа 2013 г.
7. Красавин А.Л., Алонцева Д.Л., Прохоренкова Н.В., Русакова А.В.. Способ модификации электронным пучком структуры и свойств железо - никелевого сплава. АС РК № 90443 на изобретение 30561. Инновационный патент Республики Казахстан, рег № 2014/1746.1 от 25.11.2014

в других журналах:

8. Alontseva D.L., Krasavin A.L. Computer Simulation of Temperature Profiles of a Two-Layer Sample During Heating by the Electron Beam // The Kazakh-American Free University Academic Journal, J 38, USA, Oregon, 2012. - P.252-257
- Статьи и тезисы в сборниках научных трудов Международных конференций:*
9. Alontseva D.L., Krasavin A.L., Pogrebnyak A.D., Russakova A.V. Modification of Ni -based plasma detonation coatings by a low-energy DC e-beam// Сборник тезисов IX международной конференции ION 2012 “Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons”, 25-28 июня 2012 г. Казимеш-Дольни, Польша, P. 44-45
 10. Алонцева Д.Л., Красавин А.Л., Погребняк А.Д., Темирбеков Н.М. Математическое моделирование температурных профилей для модификации электронным облучением плазменно – детонационных покрытий на основе Ni-Cr //Материалы IX Международной конференции «Перспективные

технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», 28 июня 2012, г. Астрахань, РФ, С. 71-80

11. Alontseva D.L., Krasavin A.L., Kolesnikova T.A., Pogrebnyak A.D., Russakova A.V. Computer Simulation of Temperature Profiles for E-beam Modification of Ni-Based Plasma Detonation Coatings Scientific Journal Proceedings of the International Conference “Nanomaterials: Applications and Properties”, 2012, Vol.1, No 4, Sumy, Sumy State University Publishing. - 04PITSE12-1-12-3, P.348-350 On line: www.nap.sumdu.edu.ua
12. Alontseva D.L., Krasavin A.L., Kolesnikova T.A., Russakova A.V. Computer Simulation of Temperature Profiles of a Two-Layer Sample During Heating By The Electron Beam // Proceedings of the 7th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (AIS), November 7, 2012, Szekesfehervar, Hungary. – P.53-56
13. Alontseva D.L., Krasavin A.L., Kolesnikova T.A., and Russakova A.V. Numerical Simulation of Temperature Profiles of a Two-Layer Sample During Heating by the Electron Beam // Proceedings of the International Congress on Engineering and Information (ICEAI 2013), Bangkok, Thailand, 2013. - P.53-57
14. Alontseva D., Krasavin A., Kolesnikova T. Mathematical modeling of temperature profile in bilayer metal absorbers under heating by a moving flat axisymmetric source // Материалы Международной конференции «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCI'2013)», г. Евпатория, Украина, 20-24 мая, 2013-С.7-8
15. Alontseva D.L., Krasavin A.L., Misevra S.Ya. Modeling of temperature profiles for DC pulse plasma jet mode selection in plasma detonation coatings treatment // Материалы X-ой Международной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», г. Алматы, Казахстан, 5-7 июня 2013 г.- С. 114-122
16. Alontseva D., Krasavin A., Kolesnikova T., Russakova A. Modeling of Processes Taking Place during Powder Coating Treatment by an Electron Beam or a Plasma Jet // Abstracts of 8th International Conference New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation (NEET-2013), Zakopane, Poland, June 18 - 21, 2013. –P. 33
17. Alontseva D., Krasavin A., Kolesnikova T., Russakova A. Numerical simulation of temperature profiles of a plasma-detonation Ni-based coating during irradiation by the electron beam // Abstract of the 20th International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (ISMANAM 2013), Torino, Italy, June 30 - July 5, 2013.-P.425
18. Alontseva D.L., Krasavin A.L., Russakova A.V., Sadvakasova N. Computer Simulation of Temperature Profiles for DC Pulse Plasma Jet Modification of Co-based Plasma Detonation Coatings // Scientific Journal Proceedings of the International Conference Nanomaterials: Applications and Properties, Vol 2, No 3, 2013. – P. 11-14
19. Алонцева Д.Л., Красавин А.Л., Русакова А.В. О решении линейной задачи теплопроводности для поиска оптимальных параметров нагрева защитных покрытий движущимся источником // Материалы 2-й научно-практической internet-конференции «Междисциплинарные исследования в области

- математического моделирования и информатики», Тольятти, 7-14 октября 2013 г. / отв. ред. Ю.С. Нагорнов –Ульяновск: SIMJET, 2013. – С.26-34
20. Alontseva D., Krasavin A., Russakova A., Bektasova G. Effect of irradiation with DC plasma jet on the structure-phase compositions and properties of powder Ni and Co– based coatings// Materials of 5th International Conference “Radiation Interaction with Materials: Fundamentals and Applications 2014”, 12-15 May, 2014, Kaunas, Lithuania, pp. 17-20
 21. Alontseva D., Krasavin A., Russakova A., Bektasova G. Modeling of irradiation induced processes of heat transfer in bilayer metal absorbers // Materials of 5th International Conference “Radiation Interaction with Materials: Fundamentals and Applications 2014”, 12-15 May, 2014, Kaunas, Lithuania, pp. 210-213
 22. Alontseva D., Ishkinina G., Krasavin A., Russakova A., Prohorencova N., Malyukova A., Туньбайев D. Developing the scientific basis of energy-saving technology for surface modification by irradiation// Материалы Международной научно-практической конференции «Зеленая экономика – будущее человечества», ВКГТУ, Усть-Каменогорск, 25, 26 мая 2014. – С.28-42
 23. Alontseva D., Russakova A., Krasavin A., Kolesnikova T. Modification of Powder Ni -based Coatings Subsurface Layers Using DC plasma Jet or Electron Beam Abstracts of X-th International Conference “Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons” Kazimierz Dolny, Poland June 23-26, 2014, P.49
 24. Alontseva D., Krasavin A., Russakova A. The Structure-Phase Compositions of Ni and Co Based Plasma-Detonation Coatings after Modification by Plasma Jet Abstracts of the 14th International Conference on Plasma Surface Engineering. Conference and Exhibition (PSE), September 15–19, 2014, Garmisch-Partenkirchen, Germany, P.462. PSE2014-Abstracts.doc, 19.08.2014 On line: www.pse-conferences.net/pse2014
 25. Alontseva D., Krasavin A., Russakova A., Kolesnikova T.A. Development and Experience of Implementing of a New Technology of Automated Precision Deposition of Powder Coatings // Abstracts of 9th International Conference NEET-2015, June 23 – 26, 2015, Zakopane, Poland, P. 25
 26. Alontseva D., Krasavin A., Russakova A., Modification of Powder Ni -based Coatings Subsurface Layers Using DC Plasma Jet or Electron Beam// Abstracts of 5th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress & Exhibition APMAS 2015, 16-19 April, Fethiye, Turkey, P. 168.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадыржанов К.К., Комаров Ф.Ф., Погребняк А.Д., Русаков В.С., Туркебаев Т.Э. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов, Москва: МГУ, 2005. – 640 с.
2. Алонцева Д.Л. Модификация облучением защитных покрытий и сплавов на основе Ni и Co: монография: Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 334с. (ISBN 978-3-659-27238-7).
3. Misaelides P., Hatzidimitou A., Noli F., Pogrebnyak A.D., Tyurin Yu.N., Kosionidis S., Preparation, characterization and corrosion behavior of protection coatings on stainless steel deposited by plasma detonation, Surface and Coatings Technology, 2004, Vol.180-181, pp.290-296.
4. Kuroda Seiji, Kawakita, Jin, Watanabe Makoto, Katanoda Hiroshi Warm spraying—a novel coating process based on high-velocity impact of solid particles, Sci. Technol. Adv. Mater., Vol. 9, No 3, 2008, pp 36-42.
5. Андриевский Р.А., Глезер А.М. Прочность наноструктур. Успехи физических наук, том 79, №4, 2009. – С.337-358.
6. Курзина, И.А., Козлов Э.В., Шаркеев Ю.П. Фортуна С.В., Конева Н.А., Божко И.А., Калашников М.П. Нанокристаллические интерметаллидные и нитридные структуры, формирующиеся при ионно-лучевом воздействии// отв. ред. Н.Н. Коваль: Томск: НТЛ, 2008. – 324 с.
7. Pawlowski L. The Science and Technology of Thermal Spray Coatings. New York: Wiley, 1995, 240 p.
8. Фазовые превращения при облучении. Под ред. Нолфри Ф.В.. Пер. с английского. - Челябинск: Metallurgia, 1989.- 311с.
9. Airyan E. A., Bastrukov S. I., Kaschiev M. S., Korenev S. A., Podgainyi D. V., Puzynin I. V., Fedorov A. V., Chervyakov A. M. Temperature profile and depth of surface melting of a metal irradiated by a high-current ion-beam//Russian Physics Journal, Vol. 41, No 12, 1998, (1180)