

Государственное научное учреждение
«ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ
им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси»

УДК 621.793:621.785.532

ГРИГОРЧИК

Александр Николаевич

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ОБРАБОТАННЫХ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ
ИОНОВ АЗОТА ГИПЕРЗВУКОВЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ СТАЛЬНЫХ
ПОКРЫТИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности
01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Гомель, 2016

Научная работа выполнена в Государственном научном учреждении «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»

Научный руководитель

Кукареко Владимир Аркадьевич,
доктор физико-математических наук, доцент, начальник Центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов и изделий машиностроения коллективного пользования ГНУ «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», г. Минск

Официальные оппоненты

Поболь Игорь Леонидович,
доктор технических наук, доцент, начальник Научно-исследовательского центра электронно-лучевых технологий и физики плазмы ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск

Толстомятов Евгений Максимович,
доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель

Оппонирующая организация

Учреждение образования «Белорусский национальный технический университет», г. Минск

Защита состоится «28» октября 2016 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 01.14.01 при Институте механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси по адресу: 246050, г. Гомель, ул. Кирова, д. 32а; mpri@mail.ru, тел.: (0232) 71-91-04, факс: (0232) 77-52-11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИММС НАН Беларуси по адресу: г. Гомель, ул. Кирова, д. 32а.

Автореферат разослан

«28» сентября 2016 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций



Н.С. Винидиктова

ВВЕДЕНИЕ

Формирование напыленных газотермических покрытий с особыми физико-механическими и химическими свойствами является перспективным и быстро развивающимся методом инженерии поверхности, относящимся к аддитивным технологиям. В частности, в последние годы получили интенсивное развитие методы гиперзвуковой металлизации, обеспечивающие высокую производительность и экономическую эффективность нанесения покрытий. Вместе с тем, несмотря на высокую плотность, адгезию и минимальную удельную стоимость гиперзвуковых покрытий из проволочных материалов, их механические характеристики существенно ниже, чем у монолитных материалов, что ограничивает область применения методов газотермического напыления (ГТН). В связи с этим, проблема повышения физико-механических свойств газотермических покрытий является важной задачей, актуальность которой в последние годы усиливается вследствие интенсивного развития аддитивных технологий. В целях повышения комплекса механических свойств металлических материалов обычно широко используются методы модифицирования их поверхностных слоев атомами внедрения. В частности, методы ионного и газового азотирования, а также нитроцементации позволяют существенно повысить уровень физико-механических и триботехнических характеристик сталей. Вместе с тем сложность структурного состояния напыленных материалов, содержащих оксидные слои, метастабильные фазы, дефекты кристаллической структуры, поры и т.п., делает весьма актуальной проблему адекватного описания структурно-фазовых превращений при модифицировании атомами внедрения поверхностных слоев газотермических покрытий из сталей различных классов, а также выбора метода поверхностной модификации покрытий. В частности, до настоящего времени отсутствуют систематизированные сведения о влиянии различных методов ионного азотирования на структурно-фазовое состояние и физико-механические характеристики гиперзвуковых газотермических покрытий.

В связи с этим, целью данной работы является установление закономерностей формирования структуры, фазового состава и свойств гиперзвуковых газотермических покрытий из различных сталей, модифицированных ионами азота, а также подвергнутых некоторым видам химико-термической обработки.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы научными программами (проектами), темами. Настоящая работа проводилась в рамках научно-исследовательской программы «Функциональные и композитные материалы, наноматериалы», тема 5.1.09 «Разработка технологических основ процессов формирования ионно-упрочненных гиперзвуковых газотермических покрытий и сплавов повышенной износо- и коррозионной

стойкости на основе высоколегированных инструментальных сталей» и проекта БРФФИ №Т15СО-050.

Цель и задачи исследования. Цель исследования – установить закономерности формирования структуры, фазового состава и свойств гиперзвуковых газотермических покрытий из сталей различных классов, обработанных концентрированными потоками ионов азота.

Для достижения поставленной цели решался ряд научных **задач**:

1. Изучить влияние химического состава гиперзвуковых газотермических покрытий из сталей различных классов на их структуру в исходном состоянии, а также на структурно-фазовые превращения, протекающие в поверхностных слоях покрытий при ионно-лучевом, ионно-плазменном и газовом азотировании, а также высокотемпературной нитроцементации.

2. Исследовать особенности диффузионного переноса легирующей примеси при ионном азотировании гиперзвуковых газотермических покрытий.

3. Установить закономерности влияния структуры и фазового состава, модифицированных ионами азота гиперзвуковых газотермических покрытий на их дюрометрические характеристики и износостойкость в различных условиях трения.

Научная новизна. Изучены закономерности структурно-фазового состояния напыленных гиперзвуковых газотермических покрытий из сталей различных классов. Обнаружено явление образования метастабильной аустенитной структуры в покрытии из высокохромистой мартенситной стали 95X18. Обнаружено неодинаковое содержание хрома в напыленных частицах покрытия из высокохромистой стали, связанное с различной величиной удельной площади поверхности распыляемых частиц, что приводит к более интенсивному окислению хрома в распыляемых мелких частицах покрытия.

Исследованы структурно-фазовые превращения при ионном азотировании газотермических покрытий из сталей различных классов. Установлено, что ионно-лучевое азотирование, по сравнению с ионно-плазменным, обеспечивает выделение в покрытиях высокоазотистых нитридных фаз. Установлено влияние оксидных прослоек на распределение примеси азота в поверхностном слое и по глубине покрытия. Показано, что ионно-лучевая обработка покрытий из высокохромистой аустенитной стали на стадиях формирования частиц CrN приводит к диффузионному переносу атомов хрома в азотированный слой и образованию обедненной хромом прослойки под модифицированным азотом слоем. Проведена оценка коэффициентов диффузии атомов азота при ионно-лучевом азотировании газотермического покрытия из высокохромистой стали 06X19H9T для случаев различной концентрации атомов хрома в частицах.

Установлены закономерности формирования триботехнических и дюрометрических свойств газотермических покрытий из сталей различных классов в зави-

симости от их фазового состава в исходном состоянии, а также после ионного азотирования. Показано, что присутствие метастабильного аустенита в напыленных покрытиях из мартенситных сталей приводит к фазовому $\gamma \rightarrow \alpha$ превращению при трении в различных условиях и существенному повышению их износостойкости. Установлено, что ионное азотирование приводит к более значительному упрочнению поверхностных слоев покрытий по сравнению с газовым азотированием и нитроцементацией. Определены температурные режимы ионного азотирования покрытий, обеспечивающие максимальную износостойкость и твердость их поверхностных слоев.

Положения, выносимые на защиту

К защите представляются:

1. Закономерности формирования структуры и фазового состава, модифицированных ионами азота гиперзвуковых газотермических покрытий из сталей различных классов, включающие впервые обнаруженное явление концентрационной неоднородности распределения легирующей примеси в поверхностном слое газотермических покрытий, связанное с барьерным действием оксидных прослоек на диффузионный перенос азота при ионном азотировании, а также с различием коэффициентов диффузии азота в напыленных частицах высокохромистой стали, содержащих неодинаковую концентрацию хрома;

2. Явление диффузионного переноса атомов хрома в азотированный слой газотермического покрытия из высокохромистой аустенитной стали, протекающего в процессе ионно-лучевого азотирования и приводящего к образованию обедненной хромом прослойки на границе модифицированного азотом слоя;

3. Зависимости дюрометрических свойств и характеристик износостойкости модифицированных ионами азота газотермических покрытий из сталей различных классов от структурно-фазового состояния их поверхностных слоев, что перспективно для создания износостойких материалов и покрытий;

4. Режимы ионного азотирования, обеспечивающие выделение высокоазотистых нитридов, приводящих к повышению дюрометрических свойств покрытий до 4 раз, а также к увеличению износостойкости в условиях граничного трения покрытий из мартенситных высокохромистых сталей до 5 раз, а покрытий из ферритной стали – до 140 раз.

Личный вклад соискателя состоит в проведении экспериментов, обработке и анализе полученных результатов, сопоставлении их с литературными данными, выступлениях на научных конференциях. Постановка цели и задач диссертационной работы, обсуждение полученных результатов, формулировка положений и выводов, а также подготовка статей выполнены совместно с научным руководителем д. ф.-м. н. Кукареко В.А.

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертационного исследования были доложены на следующих конференциях и симпозиумах: Междуна-

родной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, Беларусь, 2012); Международных научно-технических конференциях «Инновации в машиностроении-2012, 2014, 2015» (г. Минск, Беларусь, 2012, 2014, 2015); научно-техническом семинаре «Композиционные материалы и защитные покрытия» (г. Минск, Беларусь, 2012); 8-м международном симпозиуме «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка» (г. Минск, Беларусь, 2013); Международных научно-технических конференциях «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (г. Минск, Беларусь, 2013-2015); 6-м Белорусском конгрессе по теоретической и прикладной механике «Механика-2013» (г. Минск, Беларусь, 2013); 4-м республиканском научно-техническом семинаре «Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий» (г. Минск, Беларусь, 2014); Международной научно-технической конференции «ПОЛИКОМТ-РИБ-2015» (г. Гомель, Беларусь, 2015).

Опубликованность результатов диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 22 научных работах, в число которых входят 10 статей в рецензируемых научных журналах (общим объемом в 4,8 авторских листа) и 8 статей в научных сборниках, рекомендованных ВАК Республики Беларусь, 1 работа в сборниках материалов конференций, 3 тезиса докладов. Получен патент «Способ получения коррозионностойкого покрытия» № 19377 (от 27.04.2015). Подана заявка на способ получения стального износостойкого покрытия.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения и библиографического списка. Работа содержит 141 страницу, в том числе 90 страниц машинописного текста, 31 страницу рисунков, 10 таблиц (4 страницы) и библиографический список на 18 страницах, включающий 193 наименования литературных источников и 22 наименования публикаций соискателя. Приложение (2 страницы) содержит акт о внедрении результатов НИР.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткое обоснование актуальности работы, формулируется цель и основные задачи работы, ее научная новизна и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена литературному обзору по изучаемой теме. Рассмотрены способы получения металлических газотермических покрытий. Проанализированы особенности структурного состояния газотермических покрытий из металлических материалов.

Рассмотрены ионные методы поверхностной модификации металлических материалов. Представлены результаты исследований структурно-фазового состо-

яния и физико-механических свойств материалов на основе железа, подвергнутых обработке потоками ионов азота и химико-термической обработке. Обсуждены особенности радиационно-стимулированной диффузии в поверхностных слоях металлических материалов при ионной обработке. Проанализировано влияние ионного азотирования и стандартных способов химико-термической обработки на механические свойства металлических материалов.

Показано, что структурно-фазовое состояние, дюрометрические и триботехнические характеристики газотермических покрытий из сталей различных классов, подвергнутых ионному азотированию и химико-термической обработке, изучены неполно. Сформулированы цели и задачи исследований.

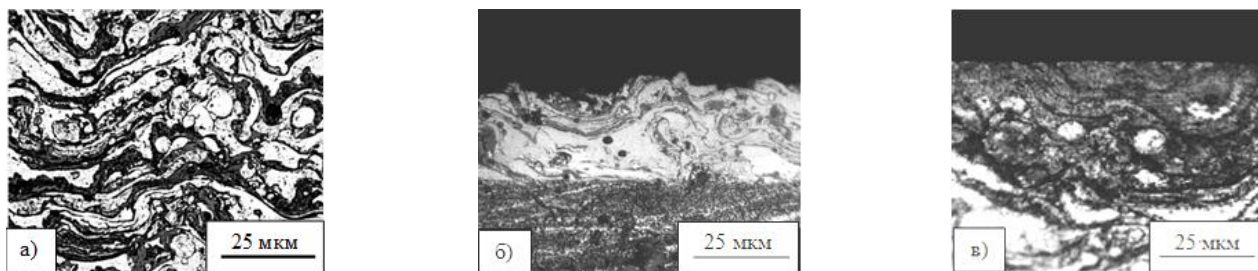
Во **второй главе** рассмотрены материалы, методики и оборудование, применяемые при проведении данной работы. Исследовались образцы гиперзвуковых газотермических покрытий из сталей различных классов: ферритного (Св-08Г2С), мартенситного (40Х13 и 95Х18) и аустенитного (06Х19Н9Т). Напыление газотермических покрытий осуществлялось с помощью установки АДМ-10, разработанной в ОИМ НАН Беларуси.

Ионно-лучевое азотирование (ИЛА) исследуемых образцов газотермических покрытий осуществлялось в среде, содержащей около 70 % ионов молекулярного азота и 30% ионов атомарного азота, при температурах 650 – 890 К, энергии ионов 3 кэВ, плотности ионного тока 2 мА/см² и продолжительности обработки, составляющей 2-3 часа. Ионно-плазменная обработка азотом (ИПА) образцов покрытий проводилась в среде 25% N₂ + 60% Ar + 15% H₂ в течение 5 часов при температуре 780 К, напряжении V=470 В и силе тока I=55 А. Газовое азотирование образцов покрытий из сталей Св-08Г2С, 40Х13 и 06Х19Н9Т выполнялось в среде 20 % NH₃ + 80 % N₂ при температуре 720 К на протяжении 13 часов. Нитроцементация проводилась в атмосфере природного газа (0,7 м³/ч) и аммиака (2,5 м³/ч) в течение 8,5 часов при температуре 1150 К. После нитроцементации проводилась закалка в масло с последующим отпуском при 430 К в течение 1 часа.

Изучение структурно-фазового состояния исследуемых образцов осуществлялось методами оптической металлографии (микроскоп АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ), сканирующей электронной микроскопии (микроскоп TESCAN VEGA 3 LMN), рентгеноструктурного анализа (дифрактометр ДРОН-3). Дюрометрические характеристики материалов определялись на твердомере Durascan 20 при нагрузках на индентор 25 г и 10 кг. Триботехнические испытания образцов покрытий проводились в условиях сухого трения на трибометре АТВП при удельной нагрузке 1,5 МПа. Триботехнические испытания в среде смазочного материала И-20 образцов покрытий из различных сталей выполнялись на трибометре МТВП при удельной нагрузке 50 МПа.

В **третьей главе** представлены результаты исследования структурно-фазовых превращений и формирования дюрометрических свойств в газотермических покрытиях из сталей различных классов при ионном азотировании.

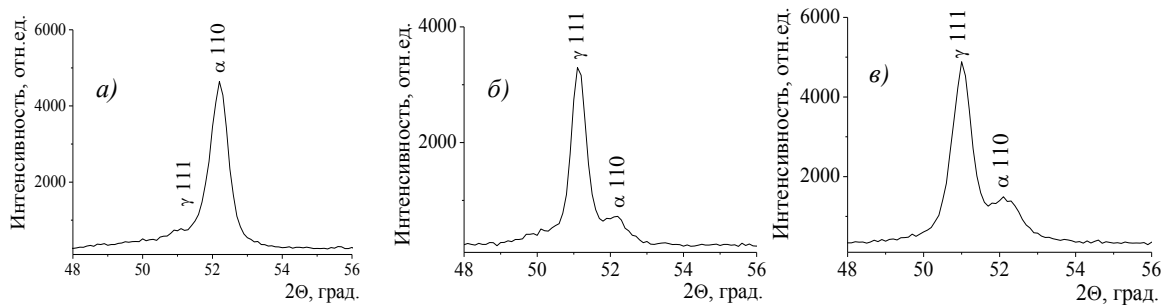
Изучено структурно-фазовое состояние и дюрометрические свойства напыленных газотермических покрытий из сталей различных классов в исходном состоянии. Показано, что в структуру газотермических покрытий входят как отдельные, обособленные оксидными прослойками частицы малого (≈ 10 мкм) и большого размера ($\approx 40-50$ мкм), так и конгломераты сплавленных между собой частиц (рисунок 1 *а*).



а – покрытие из стали 40X13; *б* – покрытие из стали 40X13 после ИЛА при 750 К (3 часа);
в – покрытие из стали 95X18 после ИПА при 780 К (5 часов)

Рисунок 1. – Микроструктуры газотермических покрытий, подвергнутых различным видам обработки

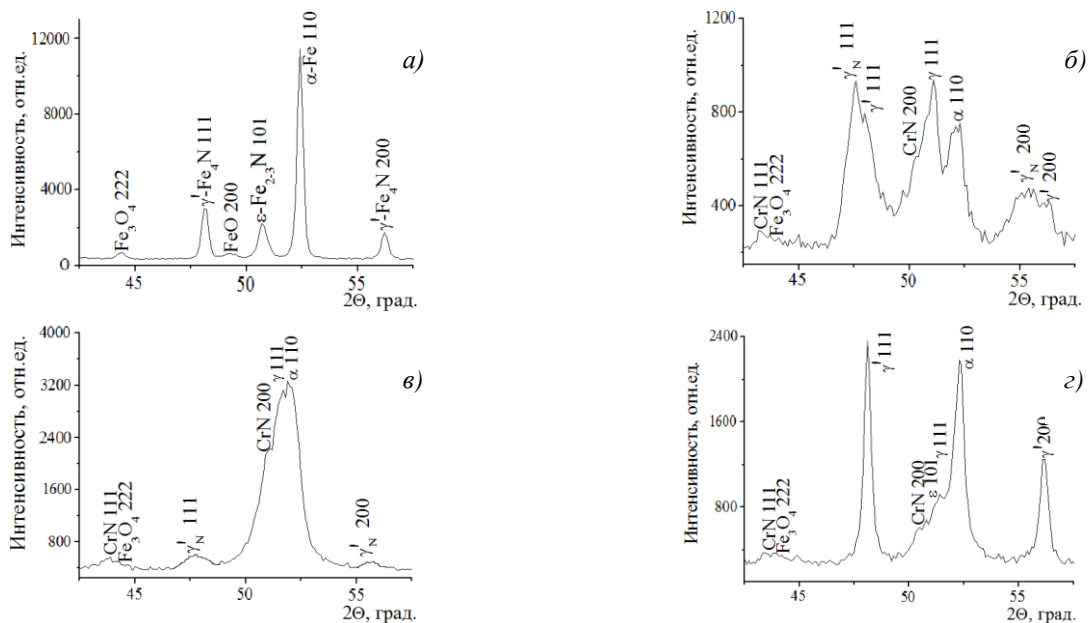
В исходном состоянии газотермическое покрытие из ферритной стали Св-08Г2С содержит α -Fe и оксиды FeO и Fe₃O₄. Твердость покрытия составляет 300 HV 10. Покрытие из аустенитной стали 06X19Н9Т содержит γ -(Fe, Cr), α -(Fe, Cr), а также легированные хромом оксиды железа типа FeO и Fe₃O₄. Содержание γ -фазы в покрытии составляет ≈ 68 об. % (рисунок 2). Твердость покрытия из аустенитной стали – 350 HV 10. В газотермических покрытиях из мартенситных сталей 40X13 и 95X18 регистрируются фазы: α -(Fe, Cr), γ -(Fe, Cr), FeO и Fe₃O₄. При этом в газотермическом покрытии из стали 40X13 обнаруживается 11 об. % γ -фазы, а в покрытии из стали 95X18 регистрируется аномально высокое содержание метастабильной аустенитной фазы, составляющее 68 об. % (рисунок 2). Твердость покрытия из стали 40X13 составляет 600 HV 10, а покрытия из стали 95X18 – 350 HV 10. Сделано заключение, что повышенное содержание γ -фазы в покрытиях из высокохромистых мартенситных сталей обусловлено проявлением термической стабилизации аустенита в процессе многослойного напыления и замедленного охлаждения покрытий. При этом повышенная концентрация углерода в покрытии из стали 95X18 обеспечивает аномально высокое содержание в нем γ -фазы. В результате этого покрытия из мартенситной стали 95X18 и аустенитной стали 06X19Н9Т имеют одинаковый фазовый состав и твердость.



a – покрытие из стали 40X13; *б* – из стали 06X19H9Т; *в* – из стали 95X18

Рисунок 2. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK_α) от поверхностных слоев газотермических покрытий из сталей различных классов

Исследовано структурно-фазовое состояние и дюротметрические свойства гиперзвуковых газотермических покрытий, подвергнутых ионно-лучевому и ионно-плазменному азотированию. Установлено, что в результате ионно-лучевого азотирования покрытия из ферритной стали Св-08Г2С при 670-870 К в нем образуются модифицированные азотом слои глубиной от ≈ 35 до 120 мкм, содержащие нитриды γ' -Fe₄N и ϵ -Fe_{2,3}N. При температурах ионной обработки 750-800 К достигается максимум дюротметрических свойств поверхностного слоя покрытия из стали Св-08Г2С (до ≈ 1000 HV 0,025), что обусловлено высоким содержанием в нем высокоазотистого нитрида ϵ -Fe_{2,3}N (рисунок 3 *a*). ИПА покрытия из ферритной стали Св-08Г2С, которое проводилось при температуре 780 К, приводит к преимущественному выделению в поверхностном слое низкоазотистой фазы γ' -Fe₄N. Микротвердость азотированного слоя при этом составляет 700 HV 0,025.



a – покрытие из стали Св-08Г2С после ИЛА при 750 К; *б* - покрытие из стали 06X19H9Т после ИЛА при 750 К; *в* - покрытие из стали 95X18 после ИЛА при 770 К; *г* - покрытие из стали 40X13 после ИЛА при 750 К

Рисунок 3. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK_α) от поверхностных слоев покрытий из сталей различных классов после ионно-лучевого азотирования

Показано, что ионно-лучевая обработка газотермического покрытия из аустенитной стали 06X19H9T при 670-870 К приводит к формированию азотированных слоев глубиной от 5 до 50 мкм, которые содержат фазу γ'_N , представляющую собой твердый раствор азота в матричной γ -(Fe, Cr) фазе с гексагонально-искаженной ГЦК решеткой, а также нитриды γ' -(Fe, Cr)₄N и CrN (рисунок 3 б). Максимальные значения микротвердости (≈ 1400 HV 0,025) покрытия из стали 06X19H9T регистрируются после ИЛА при 750-800 К, обеспечивающего образование в поверхностном слое покрытия фазы γ'_N и дисперсных частиц CrN. В результате ИПА в покрытии из аустенитной стали регистрируются фазы: γ -(Fe, Cr), α -(Fe, Cr), γ' -(Fe, Cr)₄N и CrN. Микротвердость поверхностного слоя покрытия из аустенитной стали составляет 850 HV 0,025.

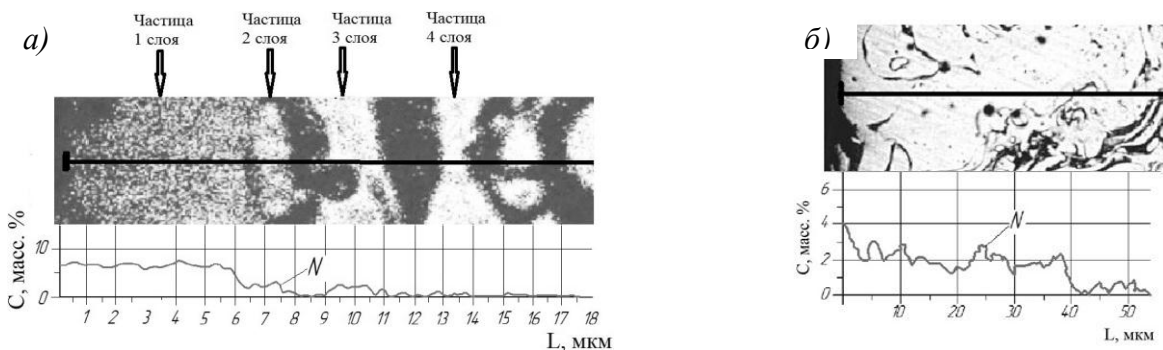
В газотермическом покрытии из мартенситной стали 95X18 с аномально высоким содержанием метастабильного аустенита в результате ионно-лучевого азотирования при 670-770 К образуются модифицированные азотом слои глубиной от 2 до 20 мкм, в которых, как и в покрытии из аустенитной стали 06X19H9T, регистрируются γ'_N и CrN (рисунок 3 в). Максимальная микротвердость (≈ 1100 HV 0,025) покрытия из стали 95X18 достигается после ИЛА при 770 К, приводящей к образованию γ'_N и CrN. При ионной обработке в модифицированном слое происходит $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение и содержание метастабильной γ -фазы уменьшается. В результате ИЛА покрытия из стали 95X18 при 890 К в поверхностном слое регистрируются фазы: α -(Fe, Cr), γ -(Fe, Cr), Fe₃O₄ и частицы CrN с размером ≥ 20 нм. Микротвердость покрытия после такой обработки снижается до 750-800 HV 0,025, что связано с коагуляцией частиц CrN. После ИПА в покрытии из стали 95X18 регистрируются нитриды γ' -(Fe, Cr)₄N, ε -(Fe, Cr)₂₋₃N и CrN. При этом микротвердость покрытия составляет 900 HV 0,025.

В покрытии из мартенситной стали 40X13 в результате ИЛА при 650-870 К образуются азотированные слои глубиной от 10 до 55 мкм (рисунок 1 б), в которых содержатся нитриды γ' -(Fe, Cr)₄N, ε -(Fe, Cr)₂₋₃N и CrN (рисунок 3 з). Микротвердость покрытия из стали 40X13 после ионной обработки азотом при 700-800 К достигает ≈ 1400 HV 0,025, что связано с образованием в нем большого количества высокоазотистого нитрида ε -(Fe, Cr)₂₋₃N и CrN. Покрытие из стали 40X13 после ИПА содержит в поверхностном слое нитридные фазы γ' -(Fe, Cr)₄N, ε -(Fe, Cr)₂₋₃N и CrN, а микротвердость поверхности в результате такой обработки составляет ≈ 1000 HV 0,025. Относительно пониженный уровень микротвердости покрытия из стали 40X13, подвергнутого ионно-плазменному азотированию обусловлено меньшим содержанием в поверхностном слое высокоазотистого нитрида ε -(Fe, Cr)₂₋₃N и CrN по сравнению с покрытием, прошедшим ИЛА при 750 К.

Сделано заключение, что в отличие от ионно-плазменной обработки ионно-лучевое азотирование покрытий из сталей Св-08Г2С и 40X13 приводит к выделению в их поверхностных слоях повышенного количества высокоазотистого нит-

рида $\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$, а в покрытиях из сталей 06X19H9T и 95X18 – к образованию фазы γ'_N . Установлено, что увеличение содержания в газотермических покрытиях углерода и хрома приводит к уменьшению глубины азотированного слоя.

С помощью сканирующей микроскопии исследовано распределение азота по глубине поверхностного слоя ионно-азотированного покрытия из высокохромистой стали 06X19H9T. Обнаружена существенная концентрационная неоднородность распределения азота в напыленных частицах поверхностного слоя покрытия. Показано, что напыленные частицы, имеющие малый подповерхностный объем, характеризуются существенно повышенным содержанием азота (≈ 8 масс. %) и более высокой микротвердостью по сравнению с крупными частицами или сплавленными конгломератами частиц покрытия (≈ 40 мкм). Предложена модель, связывающая концентрационную неоднородность распределения азота в напыленных частицах поверхностного слоя с наличием непроницаемых для диффузии азота оксидных прослоек, располагающихся на границах частиц (рисунок 4). При этом в изолированных оксидными прослойками частицах, имеющих малый подповерхностный объем, в процессе ионной обработки накапливается более высокая концентрация атомов азота по сравнению с напыленными частицами (конгломератами частиц) большего объема. Диффузионный перенос атомов азота из поверхностного слоя частиц в нижележащие слои осуществляется через мостики сплавления (сварки), соединяющие смежные напыленные частицы (рисунок 5).



а – напыленные частицы малого размера; *б* – конгломерат сплавленных частиц

Рисунок 4. – Изменение концентрации (С) азота по глубине (L) газотермического покрытия из стали 06X19H9T, прошедшего ионно-лучевую обработку при 870 К (3 часа)

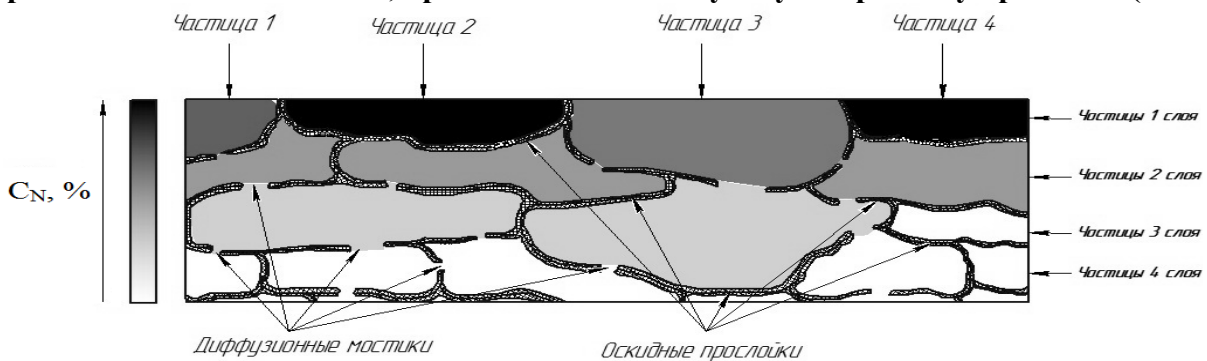


Рисунок 5. – Схема имплантированного ионами азота участка поверхностного слоя газотермического покрытия с частицами различной толщины

Исследовано распределение химических элементов по глубине азотированного покрытия из высокохромистой стали 06X19H9T. Установлено, что в процессе высокотемпературной ионно-лучевой обработки на стадиях образования нитрида CrN происходит перенос атомов хрома в азотированный слой из подповерхностного неазотированного слоя (рисунок 6). Сделано заключение, что выделение CrN приводит к обеднению матричной γ -фазы азотированного слоя атомами хрома и появлению градиента концентрации хрома в γ -фазе покрытия. Длительная изотермическая выдержка покрытия в процессе ионно-лучевого азотирования приводит к переносу атомов хрома в азотированный слой из неимплантированной азотом подложки и образованию прослойки с пониженным содержанием хрома на границе азотированного слоя (рисунок 6, 7).

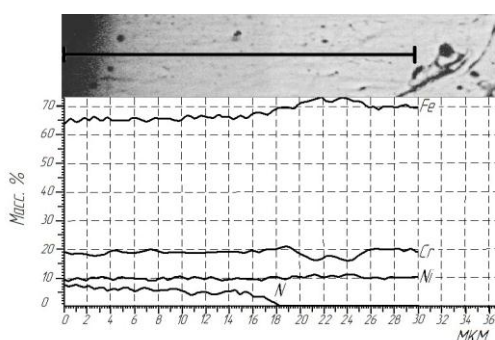


Рисунок 6. – Распределение Fe, Ni, Cr, N по глубине газотермического покрытия из стали 06X19H9T, прошедшего ионно-лучевую обработку при 870 К (3 часа)

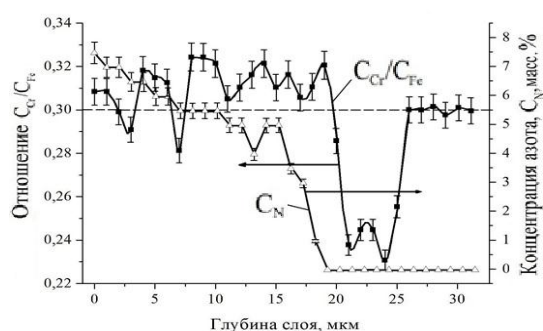
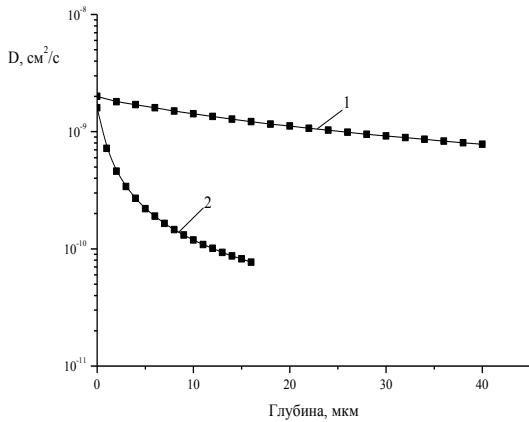


Рисунок 7. – Отношение концентраций C_{Cr}/C_{Fe} и содержание C_N по глубине газотермического покрытия из стали 06X19H9T, после модифицирования азотом при 870 К (3 часа)

Показано, что различные частицы газотермического покрытия из высокохромистой стали содержат неодинаковую концентрацию хрома. Различие в содержании хрома в напыленных частицах обусловлено интенсивным окислением мелких частиц, характеризующихся повышенной удельной площадью поверхности по сравнению с крупными частицами. Обнаружено, что в частицах с повышенным содержанием хрома в результате ионно-лучевого азотирования регистрируется пониженная глубина модифицированного слоя и сравнительно более высокая концентрация азота. Проведена оценка эффективного коэффициента диффузии (D) азота для напыленных частиц с различным содержанием хрома. Для определения D использовался метод Матано, основанный на решении уравнения Фика с использованием подстановки Больцмана. Установлено, что высокое содержание хрома в напыленных частицах покрытия из высокохромистой стали приводит к понижению коэффициента диффузии атомов азота (рисунок 8). Уменьшение значений D по глубине частиц (рисунок 8) связано с диффузией атомов хрома из подповерхностных слоев (рисунок 7), а также с обратным эффектом Киркендалла. Показано, что значения коэффициента диффузии азота в газотермическом покрытии из стали 06X19H9T при ионно-лучевом азотировании суще-

ственно (до 10^2 раз) превышают значения коэффициента диффузии азота в стали для случая газового азотирования. Сделано заключение, что ускоренный диффузионный перенос атомов азота при ионно-лучевом азотировании обусловлен генерированием большого числа неравновесных вакансий в процессе ионной обра-



1 – при содержании хрома ≈ 12 масс. %;
2 – при содержании хрома ≈ 19 масс. %
Рисунок 8. – Изменение коэффициента диффузии атомов азота по глубине частиц газотермического покрытия из стали 06Х19Н9Т с различным содержанием хрома

ботки. Проведена оценка концентрации неравновесных вакансий в ионно-азотированном слое стали 06Х19Н9Т.

В четвертой главе приведены результаты исследования износостойкости газотермических покрытий из сталей различных классов в исходном состоянии, а также после ионно-лучевого и ионно-плазменного азотирования.

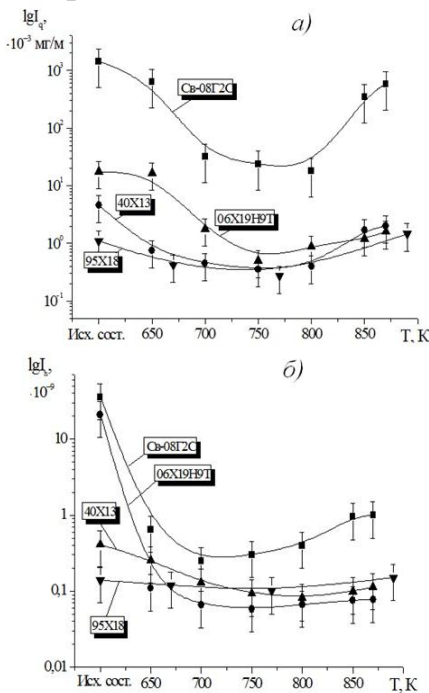
Показано, что в условиях адгезионного взаимодействия при трении без смазочного материала исходное газотермическое покрытие из ферритной стали Св-08Г2С имеет низкую износостойкость (рисунок 9 а). Покрытия из сталей

06Х19Н9Т, 40Х13 и 95Х18 в исходном состоянии имеют повышенную износостойкость по сравнению с покрытием из ферритной стали. Высокая износостойкость покрытий из сталей 06Х19Н9Т, 40Х13 и 95Х18 достигается благодаря протеканию в их поверхностных слоях при трении деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. При этом на поверхности покрытий образуется тонкий слой с высокой микротвердостью и износостойкостью. В покрытии из аустенитной стали 06Х19Н9Т деформационно-активированное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение при трении протекает менее полно вследствие повышенной стабильности аустенита, легированного никелем и хромом.

В случае испытаний в условиях граничного трения при высоком контактном давлении исходные газотермические покрытия из сталей Св-08Г2С и 06Х19Н9Т характеризуются относительно повышенным износом (рисунок 9 б), по сравнению с покрытиями из мартенситных сталей 40Х13 и 95Х18. Повышенная износостойкость покрытий из мартенситных сталей достигается за счет деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в поверхностных слоях покрытий при граничном трении в условиях высоких контактных давлений.

Ионно-лучевое азотирование покрытий приводит к существенному возрастанию их износостойкости. Установлено, что максимальное сопротивление изнашиванию покрытий из различных сталей в условиях трения без смазочного материала регистрируются после ионно-лучевого азотирования при температурах 750–800 К (рисунок 9 а). При этом износостойкость покрытий из сталей Св-08Г2С,

06X19H9T, 40X13 и 95X18 возрастает в $\approx 80, 35, 13$ и 5 раз соответственно, по сравнению с их износостойкостью в исходном состоянии. Высокое сопротивление изнашиванию для покрытия из ферритной стали Св-08Г2С достигается за счет образования в поверхностном слое высокоазотистого нитрида $\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$, а для покрытий из высокохромистых сталей 06X19H9T и 95X18 – за счет образования в их поверхностных слоях фазы γ'_N и дисперсных частиц CrN. Высокая износостойкость покрытия из стали 40X13, подвергнутого ИЛА при 750-800 К, обусловлена наличием в фазовом составе модифицированного слоя высокоазотистого нитрида $\varepsilon\text{-(Fe, Cr)}_{2-3}\text{N}$ и дисперсных частиц CrN. В результате ИЛА газотермических покрытий при повышенных температурах 850-890 К регистрируется некоторое снижение их износостойкости (рисунок 9 а). Понижение триботехнических свойств обработанного при 850-890 К покрытия из стали Св-08Г2С обусловлено уменьшением содержания в его поверхностном слое высокоазотистого нитрида $\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$. Снижение износостойкости покрытий из высокохромистых сталей, обработанных ионами азота при высоких температурах, связано с отсутствием модифицированного слое высокоазотистых фаз и коагуляцией частиц CrN.



а – трение без смазочного материала ($p=1,5$ МПа);

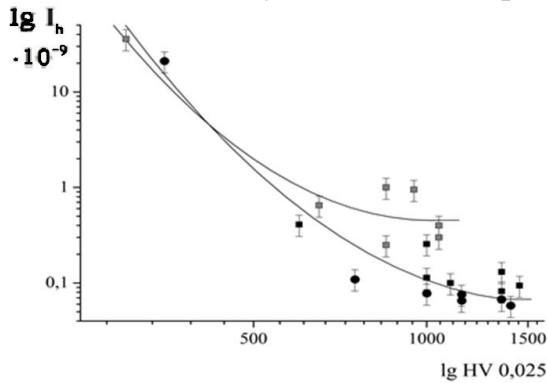
б – граничное трение в среде смазочного материала И-20 ($p=50$ МПа)

Рисунок 9. – Зависимость интенсивности массового и линейного изнашивания от температуры ионно-лучевой обработки покрытий из различных сталей

В условиях граничного трения максимальное увеличение износостойкости газотермического покрытия из ферритной стали Св-08Г2С (до 140 раз) регистрируется после ИЛА при 700-800 К (рисунок 9 б), обеспечивающего повышенный уровень микротвердости поверхностного слоя (рисунок 10). После ионно-лучевого азотирования покрытия из стали Св-08Г2С при 850-870 К регистрируется снижение его износостойкости (рисунок 9 б) и микротвердости, обусловленное уменьшением количества высокоазотистой фазы $\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$. Газотермические покрытия из высокохромистых сталей 06X19H9T, 95X18 и 40X13, подвергнутые ИЛА при 650-890 К, имеют близкий уровень триботехнических свойств в условиях граничного трения (рисунок 9 б). Повышенная износостойкость покрытий из высокохромистых сталей обусловлена их высокими дюрOMETрическими характеристиками (рисунок 10), которые достигаются за счет образования в поверхностных слоях покрытий при ионном азотировании нитридов $\gamma'\text{-(Fe, Cr)}_4\text{N}$, $\varepsilon\text{-(Fe, Cr)}_{2-3}\text{N}$ и CrN и фазы γ'_N .

Сделано заключение, что ионно-лучевое азотирование газотермических покрытий из сталей Св-08Г2С, 06X19H9T, 95X18 и

40X13 при 780 К приводит к более значительному повышению их износостойкости по сравнению с ионно-плазменной обработкой. Пониженная износостойкость газотермических покрытий, подвергнутых ИПА, обусловлена сравнительно невысоким содержанием в модифицированных слоях высокоазотистого нитрида ϵ -(Fe, Cr)₂₋₃N, а также отсутствием в покрытии из аустенитной стали фазы γ' _N.



■ - Св-08Г2С; ● - 06Х19Н9Т; ▣ - 40Х13

Рисунок 10. – Зависимость интенсивности линейного изнашивания (I_h) от микротвердости (HV 0,025) модифицированных ионами азота покрытий из сталей различных классов

В пятой главе представлены результаты исследований структурно-фазового состояния, дюрOMETрических и триботехнических характеристик газотермических покрытий из сталей Св-08Г2С, 06Х19Н9Т и 40Х13, прошедших нитроцементацию при 1150 К и газовое азотирование при 720 К.

Установлено, что высокотемпературная нитроцементация при 1150 К приводит к формированию на поверхности покрытий модифицированных слоев глубиной \approx 500-800 мкм. Обна-

ружено, что в процессе нитроцементации происходит восстановление, содержащихся в покрытии оксидов. При этом их концентрация уменьшается в \approx 10 раз по сравнению с их исходным содержанием. ДюрOMETрические и триботехнические свойства газотермических покрытий после нитроцементации, а также газового азотирования представлены в таблице 1.

Фазовый состав покрытия из стали Св-08Г2С после высокотемпературной нитроцементации включает в себя: α -Fe, Fe₃(C, N), γ -Fe, Fe₃O₄. Нитроцементированные газотермические покрытия из стали 06Х19Н9Т и 40Х13 содержат α -Fe, γ -Fe, (Fe,Cr)₃(C, N), (Fe, Cr)₇(C, N)₃, Fe₃O₄. Высокий уровень триботехнических и дюрOMETрических свойств нитроцементированных покрытий (таблица 1) достигается за счет образования в их поверхностных слоях большого количества карбонитридов и существенного снижения содержания оксидов.

Таблица 1. – Трибомеханические характеристики газотермических покрытий из сталей различных классов после нитроцементации при 1150 К (8,5 часов) и газового азотирования при 720 К

Материал покрытия и обработка		Глубина модифицированного слоя, мкм	Микротвердость, HV 0,025	Интенсивность массового изнашивания в условиях сухого трения ($p=1,5$ МПа) $I_q \cdot 10^{-3}$ мг/м	Интенсивность линейного изнашивания в условиях граничного трения ($p=50$ МПа) $I_h \cdot 10^{-9}$
Св-08Г2С	исходное состояние	-	300	1435	35,9
	нитроцементация	800	450	2,7	0,7
	газовое азотирование	150	750	-	1,0
06Х19Н9Т	исходное состояние	-	350	17,5	21,0
	нитроцементация	730	600	2,5	0,5
	газовое азотирование	100	1000	-	0,1
40Х13	исходное состояние	-	600	4,6	0,4
	нитроцементация	520	1100	2,0	0,2
	газовое азотирование	100	800	-	0,2

Показано, что в результате газового азотирования при 720 К на поверхности покрытий из сталей различных классов формируются глубокие модифицированные азотом слои от 100 до 150 мкм. После газового азотирования газотермические покрытия обладают высокими дюрOMETрическими характеристиками и триботехническими свойствами (таблица 1), которые достигаются за счет образования в модифицированных слоях покрытия из стали Св-08Г2С нитридов γ' -Fe₄N, ϵ -Fe₂₋₃N, а в покрытиях из высокохромистых сталей - γ' -(Fe, Cr)₄N, ϵ -(Fe, Cr)₂₋₃N и CrN. На основании результатов исследований сформулированы предложения по выбору методов и режимов ионного азотирования газотермических покрытий из сталей ферритного, аустенитного и мартенситного классов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертационной работы

1. Исследовано структурно-фазовое состояние газотермических покрытий из сталей различных классов в исходном состоянии, а также подвергнутых ионно-лучевому, ионно-плазменному, газовому азотированию и нитроцементации.

Установлено, что в процессе газотермического напыления высокохромистой мартенситной стали 95X18 формируется метастабильная аустенитная структура покрытия, что обусловлено высоким содержанием углерода в напыляемой стали, а также условиями формирования и охлаждения покрытия в процессе напыления [10, 16, 22, 23].

Показано, что ионное азотирование газотермического покрытия из стали ферритного класса приводит к образованию азотированных слоев, содержащих фазы ϵ -Fe₂₋₃N и γ' -Fe₄N. В случае ионного азотирования покрытий из высокохромистых сталей 06X19H9Т и 95X18 в модифицированных азотом слоях регистрируются нитриды γ' -(Fe, Cr)₄N, CrN, а также фаза γ'_N . В результате ионного азотирования газотермического покрытия из стали 40X13 в азотированных слоях образуются нитриды γ' -(Fe, Cr)₄N, ϵ -(Fe, Cr)₂₋₃N и CrN [1 – 3, 5, 6, 10, 12 – 16, 18 – 20].

Установлено, что с увеличением концентрации углерода и хрома в газотермических покрытиях из высокохромистых сталей глубина азотированного слоя уменьшается [1, 5, 16, 19].

Сделано заключение, что ионно-лучевое азотирование покрытий из сталей Св-08Г2С и 40X13 приводит, в отличие от ионно-плазменной обработки, к выделению в модифицированных поверхностных слоях повышенного количества высокоазотистого ϵ -нитрида, а в покрытиях из сталей 06X19H9Т и 95X18 – к образованию фазы γ'_N [1 – 3, 5, 6, 10, 12 – 16, 18 – 20].

2. Обнаружена концентрационная неоднородность распределения азота в напыленных частицах азотированного покрытия. Предложена модель, связывающая концентрационную неоднородность распределения азота в напыленных ча-

стицах поверхностного слоя с наличием непроницаемых для диффузии азота оксидных прослоек, располагающихся на границах частиц, а также с различием коэффициентов диффузии азота в напыленных частицах из высокохромистой стали, содержащих неодинаковую концентрацию хрома [8, 9, 11].

3. Обнаружено явление диффузионного переноса атомов хрома в азотированный слой газотермического покрытия из высокохромистой стали 06X19H9T, протекающего в процессе ионно-лучевого азотирования на стадиях формирования частиц CrN и приводящего к возрастанию содержания атомов хрома в модифицированном азотом слое и образованию прослойки с пониженной концентрацией хрома под модифицированным слоем [4].

4. С использованием метода Матано-Больцмана проведена оценка значений коэффициентов диффузии атомов азота при ионно-лучевом азотировании в частицах газотермического покрытия из стали 06X19H9T с различным содержанием хрома. Показано, что увеличение концентрации атомов хрома в напыленных частицах приводит к понижению значений коэффициентов диффузии азота. Установлено, что значения коэффициентов диффузии азота в газотермическом покрытии из стали 06X19H9T при ионно-лучевом азотировании значительно (до 10^2 раз) превышают значения коэффициентов диффузии азота для случая газового азотирования. Сделано заключение, что ускоренный диффузионный перенос атомов азота при ионно-лучевом азотировании обусловлен генерированием большого числа неравновесных вакансий в процессе ионной обработки. Проведена оценка концентрации неравновесных вакансий, генерируемых в процессе ионного азотирования и их распределения по глубине слоя [7, 11].

5. Установлено, что в процессе высокотемпературной нитроцементации происходит восстановление оксидов железа, содержащихся в покрытиях за счет углеродсодержащей насыщающей среды. Содержание оксидов в покрытии после высокотемпературной нитроцементации снижается в ≈ 10 раз по сравнению с исходным содержанием [18, 21].

6. Исследованы триботехнические и дюрометрические характеристики газотермических покрытий из сталей различных классов в исходном состоянии, а также подвергнутых ионно-лучевому, ионно-плазменному, газовому азотированию и высокотемпературной нитроцементации.

Показано, что максимальная износостойкость и микротвердость газотермических покрытий из сталей различных классов Св-08Г2С, 06X19H9T, 40X13 и 95X18 достигается после ионно-лучевого азотирования при 700-800 К. При этом в условиях адгезионного взаимодействия при трении без смазочного материала износостойкость обработанных ионами азота покрытий из сталей Св-08Г2С, 06X19H9T, 40X13 и 95X18 возрастает в 80, 35, 13 и 5 раз, соответственно [1 – 3, 10, 12 – 22].

Установлено, что при граничном трении износостойкость, обработанных ионами азота при 700-800 К покрытий из сталей Св-08Г2С, 06Х19Н9Т, 40Х13 и 95Х18, в 140, 360, 5 и 2 раза, соответственно, превышает их износостойкость в исходном состоянии. Сделано заключение, что повышенное сопротивление изнашиванию покрытия из ферритной стали Св-08Г2С после ионно-лучевой обработки достигается за счет образования в модифицированном слое высокоазотистого нитрида $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$. В случае покрытий из высокохромистых сталей 06Х19Н9Т и 95Х18 высокие триботехнические свойства после ионно-лучевого азотирования достигаются вследствие образования в модифицированном слое фаз γ'_N и дисперсных частиц CrN, а для покрытия из стали 40Х13 - за счет образования высокоазотистого нитрида $\epsilon\text{-(Fe, Cr)}_{2-3}\text{N}$ и частиц CrN. Снижение износостойкости покрытий после ионно-лучевого азотирования при повышенных температурах 850-890 К обусловлено отсутствием в модифицированном слое высокоазотистых фаз и коагуляцией частиц CrN [5, 6, 10].

7. Предложены рекомендации по выбору режимов напыления и ионного азотирования газотермических покрытий из сталей различных классов для обеспечения их высокой износостойкости [10, 11].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Практическая значимость диссертационной работы заключается в использовании установленных закономерностей изменения свойств газотермических покрытий из сталей различных классов от их структурно-фазового состояния после напыления и ионного азотирования, для создания износостойких покрытий элементов пар трения. Обнаруженные закономерности формирования структурно-фазового состояния и свойств, подвергнутых ионному азотированию газотермических покрытий, могут применяться для повышения рабочего ресурса напыленных покрытий, используемых в машиностроении (МАЗ, МТЗ, БелАЗ).

Результаты диссертационной работы были использованы при отработке режимов газотермического напыления покрытий из высокохромистых сталей мартенситного класса на элементы трибосопряжений и, в частности, в разработке и внедрении режимов напыления газотермического покрытия из износостойкой высокохромистой стали 95Х18 на цилиндры противодавления № 540-2917056 (БелАЗ) вместо гальванического хромирования. Внедрение технологии проводилось на ОАО «Кузлитмаш» (акт о внедрении результатов НИР от 28.12.2015 г.). В настоящее время цилиндры противодавления с нанесенными покрытиями проходят заводские и эксплуатационные испытания. Социальная значимость работы заключается в замене процесса гальванического хромирования не более экологически чистое газотермическое напыление покрытий.



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Влияние ионно-лучевого азотирования на структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства экономичных газотермических покрытий из проволочных сталей различных классов / В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.В. Белый, А.Н. Григорчик // Трение и износ. – 2013 (34). – № 6. – С. 621–627.
2. Структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства обработанного ионами азота газотермического покрытия из стали 40X13 / А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.В. Белый // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2014. – № 2. – С. 26–30.
3. Структура и триботехнические характеристики газотермического покрытия из проволочной стали 06X19H9T обработанного ионами азота / А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.В. Белый // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 2. – С. 61–64.
4. Особенности диффузионного переноса атомов хрома при ионно-лучевом азотировании газотермического покрытия из аустенитной стали с высоким содержанием хрома / А.В. Белый, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2015. – № 8. – С. 61–67.
5. Структурно-фазовое состояние и износостойкость в условиях граничного трения обработанных ионами азота газотермических покрытий из сталей различных классов / В.А. Кукареко, А.В. Белый, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик // Трение и износ. – 2015 (36). – № 6. – С. 661–670.
6. Расчет глубины модифицированных ионами азота слоев в стали 06X19H9T с учетом генерируемых в процессе ионного азотирования точечных дефектов / А.Н. Григорчик // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – №1 (34). – С. 87–91.
7. Особенности диффузионного переноса легирующей примеси при ионно-лучевом азотировании газотермических покрытий / А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко, А.В. Белый, М.А. Белоцерковский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – №1 (34). – С. 75–80.
8. Особенности формирования модифицированного азотом слоя при ионно-лучевой обработке гиперзвукового газотермического покрытия из аустенитной стали / А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко, Белый А.В., М.А. Белоцерковский // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – № 7. – С. 41–46.
9. Влияние технологических параметров напыления и ионного азотирования на структуру и износостойкость газотермического покрытия из высокохромистой

стали 95X18 / А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко, Белый А.В., М.А. Белоцерковский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 3. – С. 94–99.

10. Закономерности диффузии азота в процессе ионно-лучевого азотирования газотермического покрытия из аустенитной стали 06X19N9T / А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко, А.В. Белый, М.А. Белоцерковский, Б.Б. Хина // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – №2. – С. 75–80.

Статьи в научных журналах и сборниках научных трудов

11. Григорчик, А.Н. Триботехнические характеристики газотермического покрытия из проволочной стали аустенитного класса 06X19N9T после ионно-лучевого азотирования при различных температурах / А.Н. Григорчик // Композиционные материалы и защитные покрытия : сб. ст. / редкол.: П.А. Витязь. – Минск, 2012. – С. 204–211.

12. Белоцерковский, М.А. Структурно-фазовое состояние и триботехнические характеристики газотермических покрытий из проволочных сталей различных классов / М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко // Актуальные вопросы машиноведения : сб. ст. / редкол.: М.С. Высоцкий [и др.] – Минск, 2012. – С. 398–400.

13. Кукареко, В.А. Триботехнические характеристики газотермических покрытий из аустенитной стали 06X19N10T, модифицированных атомами азота / В.А. Кукареко, А.В. Белый, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы 8-ой международно-технической конференции ; редкол.: А.И. Гордиенко [и др.] – Минск, 2013. – С. 148–157.

14. Белый, А.В. Структура и триботехнические характеристики модифицированного ионами азота газотермического покрытия из стали 40X13 / А.В. Белый, А.Н. Григорчик // Актуальные вопросы машиноведения : сб. ст. / редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. – Минск, 2013. – С. 479–481.

15. Григорчик, А.Н. Структурно-фазовое состояние и износостойкость гиперзвуковых газотермических покрытий из проволочных высокохромистых сталей / А.Н. Григорчик, М.А. Белоцерковский, Н.Н. Попок // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы 9-й международно-технической конференции ; редкол.: В.А. Томило [и др.]. – Минск, 2014. – С. 117–122.

16. Кукареко, В.А. Структурно-фазовое состояние и износостойкость газотермического покрытия из высокохромистой стали 40X13, подвергнутого различным видам упрочняющей поверхностной обработки / В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик // Актуальные вопросы машиноведения : сб. ст. / редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. – Минск, 2014. – С. 354–357.

17. Григорчик, А.Н. Структурно-фазовое состояние и дюрометрические характеристики газотермических покрытий из сталей разных классов после различных видов химико-термической обработки / А.Н. Григорчик, Н.А. Мясникова, М.А. Белоцерковский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы 10-й международно-технической конференции ; редкол.: В.А. Томило [и др.]. – Минск, 2015. – С. 110–116.

18. Григорчик, А.Н. Влияние химико-термической обработки на структуру и износостойкость гиперзвуковых газотермических покрытий из стали Св-08Г2С / А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, Н.Н. Попок, Я.С. Сачивко // Актуальные вопросы машиноведения : сб. ст. / редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – Минск, 2015. – С. 370-375.

Статьи в сборниках трудов конференций

19. Григорчик, А.Н. Структура и триботехнические характеристики модифицированного ионами азота газотермического покрытия из стали 40X13 / А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.В. Белый // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: материалы 8-го Международного симпозиума ; редкол.: П.А. Витязь [и др.]. – Минск, 2013. – С. 72-78.

Тезисы докладов

20. Григорчик, А.Н., Структура и износостойкость газотермических покрытий из стали 40X13 / А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международной научно-технической конференции : редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2012. – С. 108–109.

21. Белоцерковский, М.А. Перспективы замены гальванического хромирования гиперзвуковой металлизацией с использованием высокохромистых мартенситных сталей / М.А. Белоцерковский, А.В. Сосновский, А.Н. Григорчик, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий: материалы 4-го Республиканского научно-технического семинара : редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2014. – С. 98–101.

22. Кукареко, В.А. Деформационно-активированное мартенситное превращение в газотермических покрытиях из высокохромистых сталей при сухом трении / В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «ПОЛИКОМТРИБ-2015» ; редкол.: В.Н. Адериha [и др.] – Гомель, 2015. – С. 75.

Патенты и заявки на изобретения

23. Способ получения коррозионностойкого покрытия : пат. ВУ 19377 / М.А. Белоцерковский, А.В. Белый, М.А. Леванцевич, В.А. Кукареко, А.Н. Григорчик, В.Н. Калач. – Оpubл. 11.03.2015.

24. Способ получения стального износостойкого покрытия : заявка ВУ 20140600 / М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко, А.В. Белый, А.Н. Григорчик. – Оpubл. 30.06.2016.

РЭЗІЮМЭ**Грыгорчык Аляксандр Мікалаевіч**

«Структурна-фазавы стан і трыбатэхнічныя ўласцівасці апрацаваных канцэнтраванымі патокамі іёнаў азота гіпергукавых газатэрмічных стальных пакрыццяў»

Ключавыя словы: газатэрмічныя пакрыцці, іённае азатаванне, структура, фазавы састаў, канцэнтрацыйная неаднароднасць, дыфузія, мікрацвёрдасць, зносаўстойлівасць.

Мэта работы: устанаўленне заканамернасцяў фарміравання структурна-фазавога стану і ўласцівасцяў газатэрмічных пакрыццяў са сталяў розных класаў, апрацаваных канцэнтраванымі патокамі іёнаў азота.

Метады даследавання: металаграфія, сканіруючая электронная мікраскапія, рэнтгенаструктурны аналіз, вымярэнне мікрацвёрдасці, трыбатэхнічныя выпрабаванні.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: вивучаны структурна-фазавы стан гіпергукавых газатэрмічных пакрыццяў са сталяў розных класаў у зыходным стане і пасля іённага азатавання па розным рэжымам. Выяўлена анамальна высокае ўтрыманне аўстэніта ў зыходным газатэрмічным пакрыцці з мартэнсітнай сталі 95X18. Паказана, што іённа-прамянёвае азатаванне пакрыццяў у адрозненне ад іённа-плазменнай апрацоўкі прыводзіць да фарміравання мадыфікаванага слою, які змяшчае высокаазоцістыя нітрыдныя фазы. Выяўлена, што аксідныя праслойкі, якія знаходзяцца на мяжы часціц пакрыцця, з'яўляюцца эфектыўнымі бар'ерамі для дыфузіі атамаў азота і аказваюць значны ўплыў на размеркаванне легіруючай прымесі. Паказана, што іённа-прамянёвае азатаванне пакрыццяў з высокахромістых сталяў на стадыях фарміравання часціц CrN прыводзіць да дыфузіі атамаў хрома з падпаверхневых слаёў. Устаноўлена, што высокае ўтрыманне хрома ў напыленых часціцах прыводзіць да зніжэння каэфіцыента дыфузіі атамаў азота.

Устаноўлены ўплыў фазавога састава газатэрмічных пакрыццяў, якія прайшлі іённае азатаванне, на іх трыбатэхнічныя і дзюраметрычныя ўласцівасці. Паказана, што іённа-прамянёвая апрацоўка прыводзіць да больш значнага павышэння зносаўстойлівасці і мікрацвёрдасці газатэрмічных пакрыццяў са сталяў розных класаў у параўнанні з іённа-плазменным і газавым азатаваннем, а таксама высокатэмпературнай нітрацэментацияй.

Рэкамендацыі па выкарыстанню і вобласць прымянення: атрыманыя ў рабоце вынікі могуць быць выкарыстаны для павышэння працоўнага рэсурсу напыленых пакрыццяў, якія выкарыстоўваюцца ў машынабудаванні.

РЕЗЮМЕ**Григорчик Александр Николаевич**

«Структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства обработанных концентрированными потоками ионов азота гиперзвуковых газотермических стальных покрытий»

Ключевые слова: газотермические покрытия, ионное азотирование, структура, фазовый состав, концентрационная неоднородность, диффузия, микротвердость, износостойкость.

Цель работы: установление закономерностей формирования структурно-фазового состояния и свойств газотермических покрытий из сталей различных классов, обработанных концентрированными потоками ионов азота.

Методы исследования: металлография, сканирующая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, измерение микротвердости, триботехнические испытания.

Полученные результаты и их новизна: изучено структурно-фазовое состояние гиперзвуковых газотермических покрытий из сталей различных классов в исходном состоянии и после ионного азотирования по различным режимам. Обнаружено аномально высокое содержание аустенита в исходном газотермическом покрытии из мартенситной стали 95X18. Показано, что ионно-лучевое азотирование покрытий в отличие от ионно-плазменной обработки приводит к формированию модифицированного слоя, содержащего высокоазотистые нитридные фазы. Обнаружено, что оксидные прослойки, находящиеся на границах частиц покрытия, являются эффективными барьерами для диффузии атомов азота и оказывают значительное влияние на распределение легирующей примеси. Показано, что ионно-лучевое азотирование покрытий из высокохромистых сталей на стадиях формирования частиц CrN приводит к диффузии атомов хрома из подповерхностных слоев. Установлено, что высокое содержание хрома в напыленных частицах приводит к понижению коэффициента диффузии атомов азота.

Установлено влияние фазового состава газотермических покрытий, прошедших ионное азотирование, на их триботехнические и дюрометрические свойства. Показано, что ионно-лучевая обработка приводит к более значительному повышению износостойкости и микротвердости газотермических покрытий из сталей различных классов по сравнению с ионно-плазменным и газовым азотированием, а также высокотемпературной нитроцементацией.

Рекомендации по использованию и область применения: полученные в работе результаты могут быть использованы для повышения рабочего ресурса напыленных покрытий, используемых в машиностроении.

SUMMARY

Grigorchik Alexander

«Structurally-phase state and tribological properties of the treated concentrated flows of nitrogen ions hypersonic thermal spray coating of steel »

Keywords: Thermal-sprayed coatings, ion nitriding, structure, phase composition, concentration heterogeneity, diffusion, microhardness, wear resistance.

The purpose is to establish the regularities of formation of structure and properties of high velocity oxygen fuel coatings of various steel classes treated with concentrated flows of nitrogen ions.

Experimental techniques: Metallography, scanning electron microscopy, x-ray diffraction analysis, microhardness measurements, tribological experiments.

Obtained results and their novelty: The structure of high velocity oxygen fuel (HVOF) coatings of various steel classes has been studied in the as-sprayed condition and after ion nitriding. Anomalous austenite content has been observed in the as-sprayed condition of HVOF coating made of 95X18 martensitic steel. It was shown that the ion-beam nitriding, unlike in the case of plasma immersed nitriding, leads to formation of modified layer containing nitride phases with high nitrogen content. It was found that oxide interlayers lying at the boundaries of coating particles are effective barriers for diffusion of nitrogen atoms and cause significant effect on the distribution of alloying element. It was shown that ion-beam nitriding of high-chromium steels on the stages of formation of CrN particles results in diffusion of chromium from under-surface layers. It was found that high chromium content in the sprayed particles leads to reduction of the diffusion coefficient of nitrogen atoms.

The effect of phase composition of HVOF coatings subjected to ion nitriding on microhardness and tribological properties has been established. It was found that ion-beam treatment results in more efficient improvement of microhardness and wear resistance of the HVOF coatings of various steel classes compared to plasma immersed nitriding, gaseous nitriding and high temperature nitrocarburizing.

Recommendations for use and area of application: The results obtained can be used for improving the working life of deposited coatings used in mechanical engineering.

Научное издание

Григорчик Александр Николаевич

**Структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства
обработанных концентрированными потоками ионов азота
гиперзвуковых газотермических стальных покрытий**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Подписано в печать 27.09.2016 г., Формат бумаги 60×84 1/16

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,39. Тираж 60 экз. Зак. № 320

ГНУ «ФТИ НАН Беларуси»

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/12 от 21.11.2013 г.

Ул. Купревича, 10, 220141, г. Минск