

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права
УДК 621.793.72

АСТРАШАБ
Евгений Викторович

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МАТЕРИАЛАХ СИСТЕМ
Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al И (Ni-Cr)-Al ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ИЗНОСО- И
КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

Минск, 2023

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»

Научный
руководитель

Григорчик Александр Николаевич,
кандидат технических наук, заместитель начальника
центра структурных исследований и
трибо-механических испытаний материалов и
изделий машиностроения
государственного научного учреждения
«Объединенный институт машиностроения
Национальной академии наук Беларуси», г. Минск

Официальные
оппоненты

Ласковнев Александр Петрович,
академик НАН Беларуси, доктор технических наук,
главный научный сотрудник
государственного научного учреждения «Физико-
технический институт Национальной академии наук
Беларуси», г. Минск

Астрейко Людмила Александровна,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Материаловедение в машиностроении» Белорусского
национального технического университета, г. Минск

Оппонирующая
организация

Государственное научное учреждение «Институт
механики металлополимерных систем имени В.А.
Белого НАН Беларуси», г. Гомель.

Защита состоится «14» декабря 2023 г. в 14-00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.18.01 при ФТИ НАН Беларуси по адресу: Республика Беларусь, 220141, г. Минск, ул. Купревича, 10. Тел. +375 017 267-60-10 (приемная), +375 017 367-06-05 (ученый секретарь совета), факс +375 017 263-76-93, e-mail: priemnaya@phti.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ «ФТИ НАН Беларуси».

Автореферат разослан «13» ноября 2023 г.

Ученый секретарь совета по
защите диссертаций Д 01.18.01,
кандидат технических наук



С.Д. Латушкина

ВВЕДЕНИЕ

Выход из строя различных деталей машиностроения в значительной степени связан с их износом либо коррозионным разрушением поверхности. В связи с этим к функциональным свойствам рабочих поверхностей деталей предъявляются все более жесткие требования, которые зачастую невозможно обеспечить использованием традиционных материалов и технологий их обработки. Указанная проблема требует непрерывного усовершенствования характеристик используемых материалов, методов их получения и восстановления. Одним из перспективных направлений решения данных задач является использование композиционных материалов (КМ), которые обладают повышенными физико-механическими свойствами, зачастую превосходящими свойства составляющих их компонентов.

Известные методы получения КМ (горячая или холодная прокатка, пресование и диффузионное спекание, сварка взрывом, пропитка, литье, пайка) являются сложными, трудоемкими и энергозатратными. В то же время высокопроизводительным и экономически обоснованным способом получения КМ может выступать метод высокоскоростной металлизации. Метод высокоскоростной металлизации позволяет осуществлять одновременное сверхзвуковое распыление двух проволочных материалов различного химического состава, что обеспечивает формирование композиционных покрытий с высокой адгезионной прочностью, износо- и коррозионной стойкостью, твердостью и низкой пористостью. В роли упрочняемых либо восстанавливаемых деталей могут выступать оси, валы, втулки, шпиндели, плунжеры, пальцы, пластины, подшипники скольжения, трубы и т.п. В качестве материалов для получения композиционных покрытий методом высокоскоростной металлизации целесообразно использовать доступные, относительно дешевые проволочные материалы из сталей, цветных металлов и их сплавов. Одним из наиболее перспективных видов современных КМ являются материалы на основе систем Fe-Al и Ni-Al, которые характеризуются высокой коррозионной стойкостью, жаростойкостью, износостойкостью, удельными прочностными свойствами, а также возможностью образования интерметаллидов при относительно низких температурах взаимодействия, входящих в состав КМ компонентов. При этом недостатком некоторых композиционных покрытий является повышенное содержание в них хрупких интерметаллидных фаз, что может приводить к понижению износостойкости покрытий. В связи с этим возникает необходимость управления структурой и фазовым составом композиционных покрытий, с целью повышения их рабочих характеристик. Вместе с тем в современной отечественной и зарубежной литературе практически не представлены результаты исследования закономерностей формирования структуры, фазового состава и свойств композиционных покрытий на основе систем Fe-Al и Ni-Al, полученных методом высокоско-

ростной металлизации. Кроме этого, отсутствуют систематизированные данные о структурно-фазовых превращениях и изменениях свойств композиционных покрытий при их отжиге, в результате которого в покрытиях будет изменяться объемное содержание интерметаллидных соединений различного стехиометрического состава.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует приоритетному направлению научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021-2025 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156) раздела 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы»: «композиционные и многофункциональные материалы». Настоящая работа проводилась в рамках следующих заданий государственных программ научных исследований: задание 4.1.07 «Развитие научных основ и разработка технологий комбинированной ионной обработки инструментальных материалов и газотермических покрытий для формирования износ- и коррозионностойких слоев с повышенными когезионными и прочностными характеристиками» ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии (Физматтех)» (2016-2018, № гос. рег. 20162335); задание 4.1.30 «Создание научных и технологических основ формирования и инженерии поверхностей газотермических покрытий тяжело нагруженных узлов трения на основе мартенситных хромистых сталей и медных сплавов, полученных с использованием высокоэнтальпийных газов» ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Плазменные и пучковые технологии» (2019-2020, № гос. рег. 20191165); задание 2.11.1 «Развитие научно-методологических основ и технологических принципов формирования наноструктурных металло- и полимерматричных материалов и покрытий методами металлизации, механохимического синтеза, индукционной наплавки, плакирования и трибомеханического модифицирования, обеспечивающих улучшение эксплуатационных характеристик, тяжело нагруженных узлов трения машин и оборудования» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника» («Наноструктура») (2021-2024, № гос. рег. 20210992).

Цель и задачи исследования

Целью работы является изучение структурно-фазовых превращений в материалах систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al при получении износ- и коррозионностойких покрытий для деталей машиностроения, а также разработка рекомендаций по выбору материалов покрытий, режимов их отжига с целью повышения эксплуатационных свойств.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

– исследовать закономерности формирования структуры, фазового состава и свойств композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al при их высокоскоростной металлизации;

– изучить структурно-фазовые превращения, протекающие в композиционных покрытиях на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al при их отжиге;

– исследовать триботехнические свойства, коррозионную стойкость и твердость композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al, в исходном состоянии и после отжига;

– разработать и внедрить рекомендации по выбору материалов для высокоскоростной металлизации композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al, а также режимам их отжига, обеспечивающие повышение износо- и коррозионной стойкости покрытий.

Объектом исследования являлись композиционные покрытия на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al в исходном состоянии и после отжига.

Предметом исследования являлись процессы формирования структуры, фазового состава и свойств композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al при их напылении и последующем отжиге.

Научная новизна

1. Установлены закономерности формирования структуры и фазового состава композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al, включающие образование расплавов переменного состава вследствие контактного взаимодействия компонентов в жидком состоянии на стадии распыления и последующую реакционную диффузию между компонентами сплавов в твердом состоянии при отжиге, что позволило сформировать многокомпонентные композиционные покрытия, содержащие фазы AlFe, AlFe₃ в системах Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и фазы AlNi, AlNi₃ в системе (Ni-Cr)-Al, снизить концентрацию оксидов в Fe-Al покрытиях (до 5-8 об.%) по сравнению с покрытиями из сталей, повысить коррозионную стойкость Fe-Al и (Fe-Cr-Ni)-Al покрытий в 4,2 и 1,6 раза соответственно.

2. Установлено, что образование расплавов компонентов с переменным составом на стадии напыления композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al приводит к одновременному образованию интерметаллидных соединений различного стехиометрического состава при отжиге покрытий, что позволяет получать железо-алюминиевые и никель-алюминиевые покрытия, содержащие интерметаллидные соединения AlFe, AlFe₃ и Al₁₃Fe₄, Al₃Fe, Al₅Fe₂ (до ≈ 60 об.%), а также AlNi, AlNi₃ и Al₃Ni, Al₃Ni₂ (до ≈ 50 об.%).

3. Установлено влияние температуры и времени выдержки при отжиге на структуру и фазовый состав композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al, что позволяет управлять их пористостью, а также снизить содержание интерметаллидных фаз $Al_{13}Fe_4$, Al_3Fe , Al_5Fe_2 и Al_3Ni , Al_3Ni_2 , отличающихся повышенной хрупкостью, и повысить содержание фаз AlFe, AlFe₃ и AlNi, AlNi₃, что приводит к увеличению твердости, микротвердости, адгезионной прочности и износостойкости композиционных покрытий.

4. Разработаны экспериментально-статистические математические модели влияния режимов отжига на износостойкость композиционных покрытий на основе систем (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al, устанавливающие влияние температурно-временных режимов отжига на их триботехнические свойства и раскрывающие взаимосвязь интенсивностей изнашивания при трении без смазочного материала и со смазочным материалом с режимами отжига покрытий, что позволяет выбирать режимы отжига покрытий для достижения их повышенной износостойкости.

Положения, выносимые на защиту

1. Закономерности формирования структуры и фазового состава композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al, отличающиеся учетом контактного взаимодействия компонентов в жидком состоянии, приводящего к образованию расплавов переменного состава на стадии распыления с последующей реакционной диффузией между частицами сплавов при отжиге, что обеспечивает снижение содержания оксидов до 5-8 об.%, повышение коррозионной стойкости до 4,2 раз композиционных покрытий и образование интерметаллидных фаз AlFe₃, AlNi.

2. Механизм структурно-фазовых превращений при отжиге композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al в интервале температур 350-920 °С, отличающийся протеканием реакционной диффузии во множестве диффузионных пар с различным соотношением содержания компонентов, что приводит к одновременному образованию интерметаллидных фаз AlFe, AlFe₃ и AlNi, AlNi₃, а также $Al_{13}Fe_4$, Al_3Fe , Al_5Fe_2 и Al_3Ni , Al_3Ni_2 , расположенных в виде отдельных частиц, распределенных случайным образом в объеме покрытий, что обеспечивает повышение твердости до $\approx 1,3$ раз, микротвердости до $\approx 1,8$ раз, адгезионной прочности до $\approx 1,4$ раз и износостойкости до ≈ 24 раз композиционных покрытий.

3. Закономерности изменения триботехнических свойств композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al от температуры их отжига в интервале 500-700 °С и времени выдержки в течение 20-60 минут, включающие экспериментально установленные значения интенсивностей изнашивания покрытий при трении без смазочного материала и трении со смазочным материалом и разработанные экспериментально-статистические математические модели, описывающие зависимости интенсивностей массового и

линейного изнашивания от температуры и продолжительности выдержки при отжиге композиционных покрытий, что позволило установить режимы отжига покрытий, обеспечивающие их максимальную износостойкость и заключающиеся в отжиге Fe-Al композиционного покрытия при температуре 530 °С в течение 60 минут, отжиге (Fe-Cr-Ni)-Al композиционного покрытия при температуре 580-590 °С в течение 40-45 минут и отжиге (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия при температуре 630-640 °С в течение 40-50 минут.

Личный вклад соискателя ученой степени

Все основные результаты исследований, представленные в диссертационной работе, получены соискателем самостоятельно. Работа выполнена под руководством кандидата технических наук А.Н. Григорчика, совместно с которым были сформулированы цели и задачи исследований, а также обсуждены и интерпретированы полученные результаты. Профессор, д.ф.-м.н. Кукареко В.А. принимал участие в интерпретации результатов. Соавторы совместно опубликованных работ д.т.н. Коробов Ю.С. и к.т.н. Посылкина О.И. принимали участие в проведении отдельных экспериментальных исследований и обработке их результатов. Сотрудники лаборатории газотермических методов упрочнения деталей машин Объединенного института машиностроения Национальной академии наук Беларуси профессор, д.т.н. Белоцерковский М.А. и к.т.н. Сосновский А.В. принимали участие в выборе режимов высокоскоростной металлизации покрытий, их напылении, а также анализе результатов исследований.

Апробация результатов диссертации и информация об использовании её результатов

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих конференциях и симпозиумах: VIII Белорусском конгрессе по теоретической и прикладной механике «Механика – 2019» (г. Минск, Беларусь, 2019); Международных научно-технических конференциях «Инновации в машиностроении-2020, 2021» (г. Минск, Беларусь, 2020, 2021); Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в машиностроении» (г. Новополоцк, Беларусь, 2020); Международном симпозиуме «Перспективные материалы и технологии» (г. Минск, Беларусь, 2020); Международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (г. Минск, Беларусь, 2022);

Разработаны рекомендации по выбору материалов для высокоскоростной металлизации и режимам отжига композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al, обеспечивающие повышение их износо- и коррозионной стойкости. На основе рекомендаций разработан типовой технологический процесс напыления и отжига (Ni-Cr)-Al покрытия (ТП № 01271.0041.000), который используются в НП ООО «МАД» при изготовлении запасных частей для оборудования высокоскоростной металлизации, в частности повышения их износо- и коррозионной стойкости.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 14 научных работах, в том числе 6 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК Республики Беларусь (общим объемом 1,8 авторских листа), 5 статей в научных журналах иностранных государств, 3 статьи в сборниках научных трудов и конференций. Получен 1 патент на изобретение в Евразийском патентном ведомстве.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 193 страницы, включая 86 страниц машинописного текста, 85 иллюстраций, 69 таблиц, библиографический список из 161 наименований использованных источников на 14 страницах, список публикаций соискателя из 14 наименований на 3 страницах и 3 приложений на 25 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** приведен аналитический обзор литературы, в котором рассмотрены структура, фазовый состав и свойства композиционных материалов систем Fe-Al и Ni-Al, а также проанализированы методы их получения. Представлены современные данные о структуре, физико-механических характеристиках, а также о перспективности получения композиционных покрытий из различных материалов. Отображены особенности диффузионного взаимодействия компонентов композиционных материалов систем Fe-Al и Ni-Al. Отмечено, что метод высокоскоростной металлизации является высокопроизводительным и экономически эффективным методом получения КМ, позволяющим упрочнять и восстанавливать различные детали машиностроения. Отжиг композиционных покрытий на основе систем Fe-Al и Ni-Al, полученных методом высокоскоростной металлизации, обеспечит образование в них интерметаллидных соединений, существенно повышающих их физико-механические свойства. Сформулированы цели и задачи исследований композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al.

Во **второй главе** представлено описание материалов и оборудования, а также методики исследований структуры, фазового состава и свойств покрытий систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al. В качестве исходных материалов для напыления композиционных покрытий использовались проволоки из сталей 08Г2С (диаметр 1,8 мм), 06Х19Н9Т (диаметр 1,6 мм), никелевого сплава Х20Н80 (диаметр 1,8 мм), а также алюминия АД1 (диаметр 2,0 мм) и АК12 (диаметр 2,0 мм). Выбор проволочных материалов обусловлен их физико-механическими свойствами, перспективностью последующего термического упрочнения, а также их распространенностью и стоимостью.

Высокоскоростная металлизация композиционных покрытий Fe-Al (08Г2С+АК12), (Fe-Cr-Ni)-Al (06Х19Н9Т+АД1), (Ni-Cr)-Al (Х20Н80+АД1) проводилась с использованием установки АДМ-10 (Республика Беларусь, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси). Толщина напыленных покрытий составляла $\approx 1,0$ мм. Отжиг покрытий по различным режимам выполнялся в муфельной печи SNOL 7.2/1100 (Литва, Snol).

Отжиг Fe-Al покрытия проводился в интервале температур 350-550 °С в течение 10 часов, а также в интервале температур 570-920 °С - в течение 5-20 минут, при температурах 510, 530, 550 °С - в течение 1 часа и при 530 °С - в течение 1 часа, с последующим охлаждением с различной скоростью. Отжиг (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al покрытий проводился в интервале температур 350-550 °С в течение 10 часов, а также при температурах 550, 600, 650 °С в течение 20, 40 и 60 минут.

Химический анализ покрытий осуществлялся на флуоресцентном спектрометре Epsilon 1 (Нидерланды, PANalytical). Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ (Россия, Альтами), а также с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 (Чехия, TESCAN) с рентгеноспектральным анализатором. Исследование фазового состава покрытий осуществлялось на дифрактометре ДРОН-3.0 (Россия, Буревестник). Анализ рентгенограмм осуществлялся при помощи программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотекой PDF-2, а также программного обеспечения Almaz. Измерения твердости и микротвердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20 (Австрия, ЕМКО-TEST Prufmaschinen GmbH). Определение коррозионной стойкости сформированных покрытий проводилось при помощи потенциостата Multi Autolab М 204 (Швейцария, Metrohm). Адгезионная прочность покрытий исследовалась с помощью штифтового метода оценки прочности сцепления. Триботехнические испытания образцов покрытий проводились на трибометре АТВП (Республика Беларусь, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси) по схеме возвратно-поступательного движения призматического образца по пластинчатому контртелу из закаленной стали У8. Триботехнические испытания проводились в условиях трения без смазочного материала при удельной нагрузке 1,5 МПа, а также в условиях трения со смазочным материалом И-20 при нагрузке 10 МПа.

В **третьей главе** представлены результаты исследований структурно-фазового состояния и свойств Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al композиционных покрытий. Проведено сравнение структуры, фазового состава и свойств композиционных покрытий с покрытиями из стали 08Г2С, 06Х19Н9Т и сплава Х20Н80.

Покрытие Fe-Al. Установлено, что при высокоскоростной металлизации формируется Fe-Al композиционное покрытие переменного состава, которое

содержит чередующиеся в случайной последовательности стальные частицы 08Г2С и частицы алюминиевого сплава АК12 (рисунок 1), а также располагающиеся между ними оксиды. Фазовый состав покрытия включает в себя: α -Fe, Al, Al_2O_3 , и Fe_3O_4 . Микротвердость и твердость покрытия Fe-Al составляют 270 HV 0,025 и 180 HV 10, соответственно. Показано, что Fe-Al композиционное покрытие содержит пониженное количество оксидов железа (5-8 об. %) по сравнению с покрытием из стали 08Г2С (≈ 25 об. %) (рисунок 2). Кроме того, значение параметра кристаллической решетки фазы α -Fe композиционного покрытия Fe-Al ($a = 0,28753$ нм) существенно превышает соответствующее значение параметра кристаллической решетки фазы α -Fe покрытия стали 08Г2С ($a = 0,28665$ нм). Низкое содержание оксидов железа, а также существенно увеличенное значение параметра кристаллической решетки фазы α -Fe связано с контактным взаимодействием стальных и алюминиевых частиц в процессе металлизации. В частности, при расплавлении электрической дугой проволочных материалов и в полете в сверхзвуковой газовой струе расплавленных компонентов происходит их контактное взаимодействие, частичное смешение расплавов, а также смачивание закристаллизованных частиц стали расплавленным алюминием, что предотвращает их окисление и обеспечивает образование железо-алюминиевых сплавов с переменным составом.

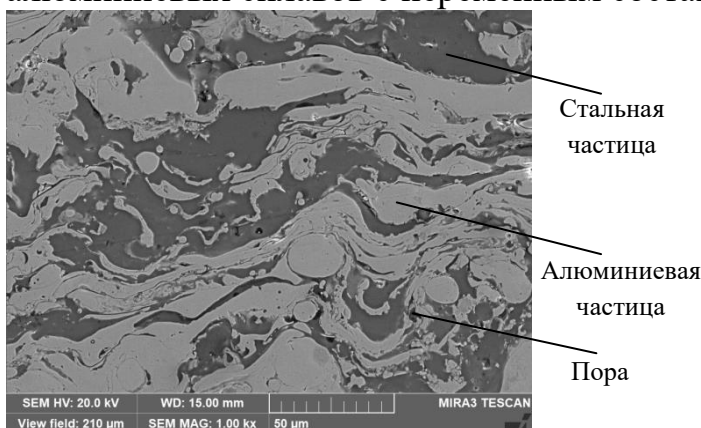


Рисунок 1 – Характерная микроструктура (поперечное сечение) Fe-Al покрытия (светлые области – стальные частицы, темные области – алюминиевые)

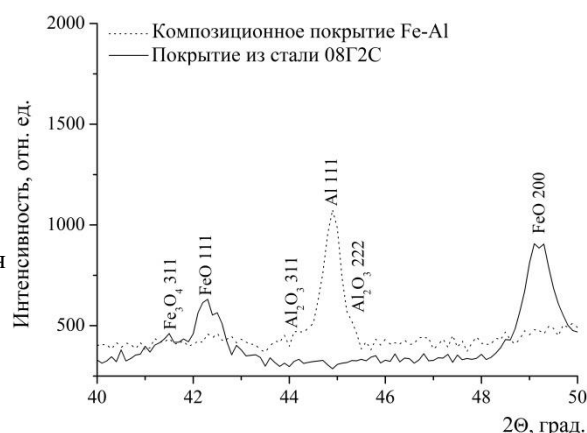


Рисунок 2 – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK_α) от поверхности покрытия из стали 08Г2С и композиционного покрытия Fe-Al

Анализ состава стальных и алюминиевых частиц покрытия Fe-Al позволил установить, что стальные частицы содержат до ≈ 2 масс. % Al, а в некоторых приповерхностных слоях частиц содержание алюминия достигает ≈ 21 масс. %. Кроме того, содержание железа в алюминиевых частицах покрытия достигает 4 - 10 масс. %. Наличие алюминия в стальных частицах покрытия и железа в алюминиевых, так же свидетельствует о контактном взаимодействии и частичном смешении стальных и алюминиевых частиц в процессе напыления.

Из результатов исследований коррозионной стойкости установлено, что Fe-Al композиционное покрытие ($I_{\text{корр}}=0,53 \times 10^{-5}$ А) обладает в 4,2 раза более

высокой стойкостью к коррозионному разрушению по сравнению с покрытием из стали 08Г2С ($I_{\text{корр}}=2,24 \times 10^{-5}$ А). Это связано с образованием частиц железо-алюминиевого сплава в результате контактного взаимодействия компонентов в процессе формирования покрытия Fe-Al, содержанием пониженного количества оксидов железа, а также образованием на поверхности алюминиевых частиц оксидной пленки Al_2O_3 , обладающей относительно высокой коррозионной стойкостью в различных средах (воздухе, воде, солевых растворах, кислотах).

Отжиг композиционного покрытия Fe-Al приводит к значительному изменению его структуры, фазового состава (рисунок 3), повышению твердости в 1,2-1,4 раза, микротвердости в 1,2-1,7 раз, адгезионной прочности на ≈ 10 % и увеличению пористости от 7 до 37 об. % (рисунок 4). При отжиге Fe-Al покрытия протекает реакционная диффузия во множестве диффузионных пар с различными соотношениями размеров компонентов (переменного состава) покрытия, приводящая к одновременному образованию интерметаллидных соединений AlFe , AlFe_3 , а также $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$, Al_3Fe , Al_5Fe_2 в общем количестве до ≈ 60 об. % со средним размером кристаллов до ≈ 60 нм и распределенных в объеме покрытия случайным образом. Одновременное образование интерметаллидных фаз AlFe , AlFe_3 и $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$, Al_3Fe , Al_5Fe_2 является нехарактерным при отжиге материалов систем «сталь-алюминий» и обусловлено различной концентрацией компонентов в ограниченных микрообъемах покрытия.

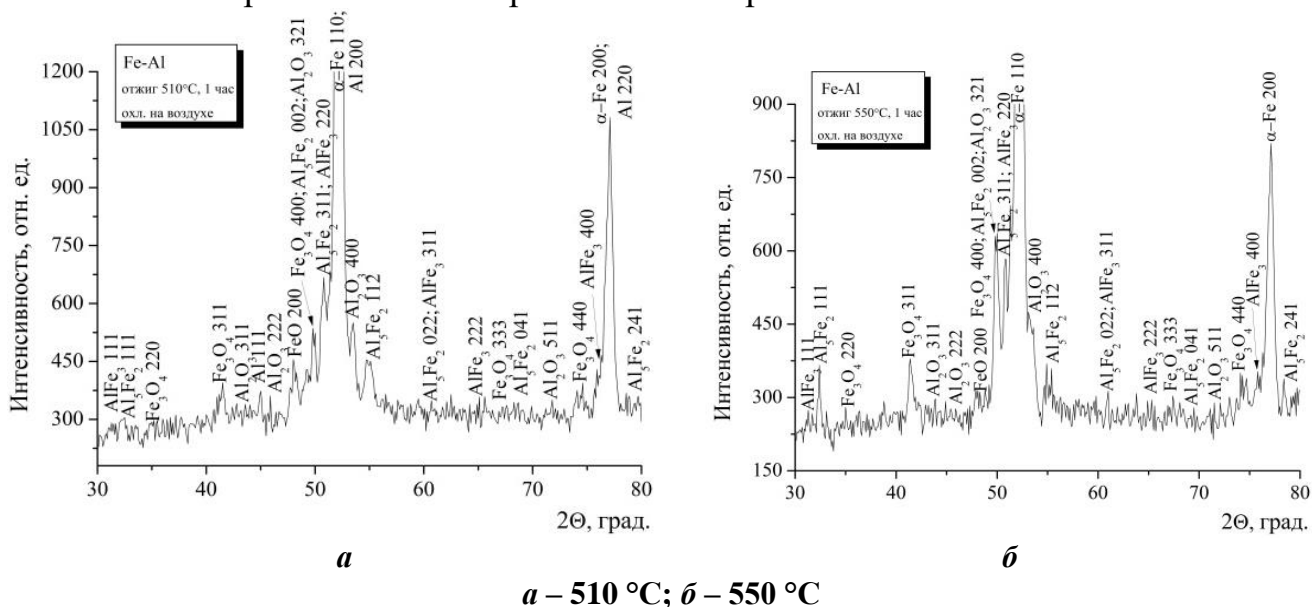


Рисунок 3 – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK_α) от поверхности Fe-Al покрытия после термической обработки в течение 1 часа

Увеличение пористости покрытия Fe-Al при отжиге (до 7-37 об.%) связано с реализацией эффектов Френкеля и Киркендалла, заключающихся в том, что при отжиге двух разнородных материалов происходит диффузия атомов более активного компонента по вакансионному механизму, при этом вакансии перемещаются в направлении обратном потоку диффундирующих атомов и, конденсируясь на дефектах кристаллической решетки и межслойных границах, формируют вакансионные поры. Кроме этого, повышение пористости связано с

разницей удельных объемов алюминия ($\rho = 2,699 \text{ г/см}^3$) и образующихся в нем интерметаллидов, характеризующихся более высокой плотностью ($\rho \approx 3,643\text{--}6,570 \text{ г/см}^3$).

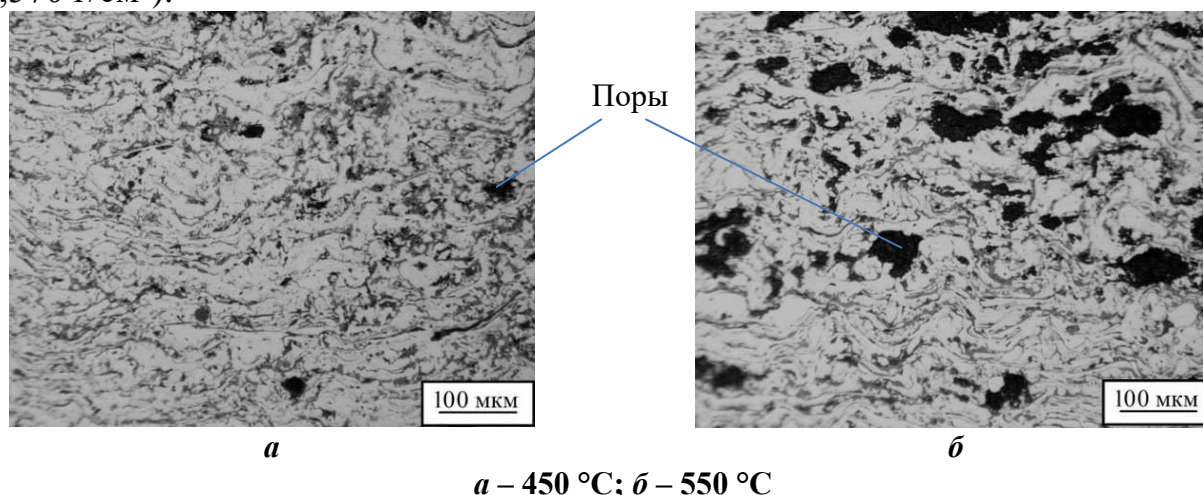


Рисунок 4 – Характерные микроструктуры Fe-Al покрытия после отжига при различных температурах в течение 10 часов

На основании результатов рентгеноструктурного анализа сделано заключение, что диффузионное взаимодействие компонентов композиционного покрытия интенсифицируется повышенным количеством дефектов кристаллической решетки, содержащихся в напыленных частицах. Частицы стали и алюминия находятся в метастабильном состоянии вследствие интенсивной пластической деформации при соударении частично закристаллизованных частиц с поверхностью подложки в процессе высокоскоростной металлизации.

Покрытие (Fe-Cr-Ni)-Al. Установлено, что (Fe-Cr-Ni)-Al покрытие состоит из α -Fe (≈ 30 об. %) и γ -Fe (≈ 15 об. %), алюминия (Al), оксидов Fe_3O_4 и Al_2O_3 (< 5 об. %), а также интерметаллида AlFe_3 (≈ 5 об.%). Адгезионная прочность покрытия составляет ≈ 113 МПа. Образование в стальных частицах композиционного покрытия большого количества метастабильной фазы α -Fe, связано с ферритизирующим действием алюминия (существенно сужающим область существования фазы γ -Fe в системе Fe-C), который легирует стальные частицы в процессе металлизации. Микротвердость и твердость покрытия составляет 370 HV 0,025 и 180 HV 10, соответственно. Установлено, что сопротивление к коррозионному разрушению (Fe-Cr-Ni)-Al композиционного покрытия ($I_{\text{корр}}=0,93 \times 10^{-5}$ А) выше в 1,6 раза по сравнению с покрытием из стали 06X19H9T ($I_{\text{корр}}=1,47 \times 10^{-5}$ А). Повышенная коррозионная стойкость (Fe-Cr-Ni)-Al покрытия обусловлена наличием в покрытии частиц алюминия с оксидной пленкой Al_2O_3 , а также образованием частиц железо-алюминиевого сплава, образующегося в результате смешения компонентов покрытия при напылении.

Отжиг (Fe-Cr-Ni)-Al покрытия приводит к реакционной диффузии между стальными и алюминиевыми частицами переменного состава в условиях их ограниченных объемов, обеспечивающей образование в них интерметаллидных соединений AlFe_3 и AlFe , а также $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$, Al_5Fe_2 (рисунок 5) в количестве до \approx

55 об. % со средним размером кристаллов до ≈ 18 нм, повышению пористости покрытия (до 7-50 об. %), адгезионной прочности на ≈ 15 %, а также увеличению микротвердости и твердости. Алюминиевые частицы (Fe-Cr-Ni)-Al покрытия после отжига при 550 °С в течение 10 часов имеют гетерогенный химический состав и включают в себя до ≈ 40 масс. % Fe, до ≈ 9 масс. % Cr и до ≈ 5 масс. % Ni. В то же время стальные частицы включают в себя до ≈ 8 масс. % Al. Высокое содержание Fe, Cr и Ni в алюминиевых частицах покрытия после отжига свидетельствует о диффузии железа и легирующих элементов в алюминиевые частицы. Различие в повышении пористости покрытия (Fe-Cr-Ni)-Al до 50 об.% по сравнению с повышением пористости Fe-Al покрытия до 37 об.%, связано с большей концентрацией алюминия в покрытии (Fe-Cr-Ni)-Al за счет использования стальной проволоки меньшего диаметра при напылении.

Присутствие в (Fe-Cr-Ni)-Al композиционном покрытии ≈ 5 масс. % Ni и ≈ 10 масс. % Cr, находящихся в твердом растворе α -Fe и γ -Fe, не приводит к образованию при отжиге покрытия интерметаллидов на базе никеля/хрома и алюминия. Можно полагать, что атомы хрома и никеля присутствуют в образующихся интерметаллидах железо-алюминий вследствие широкой области гомогенности фаз AlFe и AlFe₃.

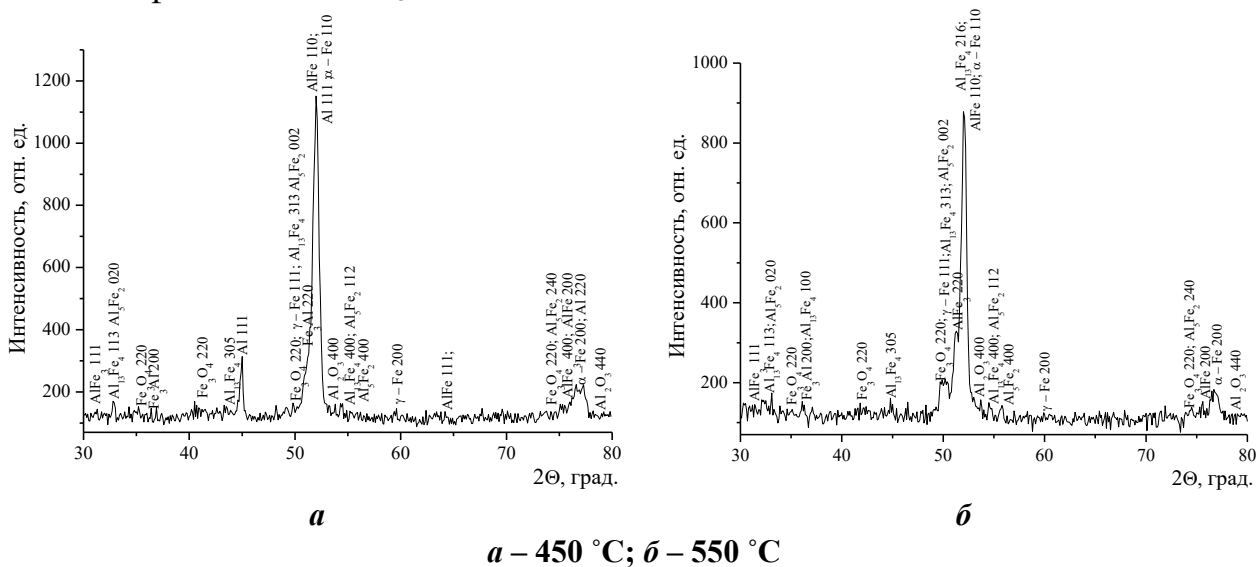


Рисунок 5 – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK α) от поверхности (Fe-Cr-Ni)-Al покрытия после термической обработки при различных температурах в течение 10 часов

Микротвердость и твердость (Fe-Cr-Ni)-Al покрытия в результате отжига увеличиваются в 1,2-1,8 и 1,1-1,3 раза, соответственно, по сравнению с исходным состоянием. Рост микротвердости и твердости покрытия при отжиге обусловлен образованием в нем интерметаллидных соединений.

Покрытие (Ni-Cr)-Al. Фазовый состав (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия включает фазы γ -(Ni, Cr), Al, оксид Al₂O₃, а также интерметаллид NiAl (5-7 об.%). Микротвердость и твердость покрытия составляет 250 HV 0,025 и 160 HV 10, соответственно. Прочность сцепления покрытия (Ni-Cr)-Al с подложкой составляет 96 МПа. Установлено, что коррозионная стойкость (Ni-Cr)-

Al композиционного покрытия ($I_{\text{корр}}=1,07 \times 10^{-5}$ А) понижена в 2,1 раза по сравнению с покрытием из сплава Х20Н80 ($I_{\text{корр}}=0,50 \times 10^{-5}$ А), что связано с присутствием алюминиевых частиц, имеющих оксид обладающий пониженной коррозионной стойкостью по сравнению с никель-хромовым оксидом, образующимся на поверхности нихромовых частиц. Пористость покрытия, полученного методом высокоскоростной металлизации, составляет 3-5 об. %.

При отжиге покрытия (Ni-Cr)-Al протекает реакционная диффузия между нихромовыми и алюминиевыми частицами переменного состава в условиях их ограниченных объемов, что приводит к одновременному образованию в нем интерметаллидных соединений AlNi и AlNi₃, а также Al₃Ni, Al₃Ni₂ (рисунок 6) в количестве до ≈ 50 об. % со средним размером кристаллов интерметаллидных соединений до ≈ 32 нм. При этом пористость композита повышается до 7-23 об. %, адгезионная прочность до ≈ 40 %, а микротвердость и твердость в 1,2-1,6 и 1,1-1,5 раза, соответственно. Повышение пористости (Ni-Cr)-Al покрытия соответствуют механизмам, представленным при описании повышения пористости Fe-Al покрытия.

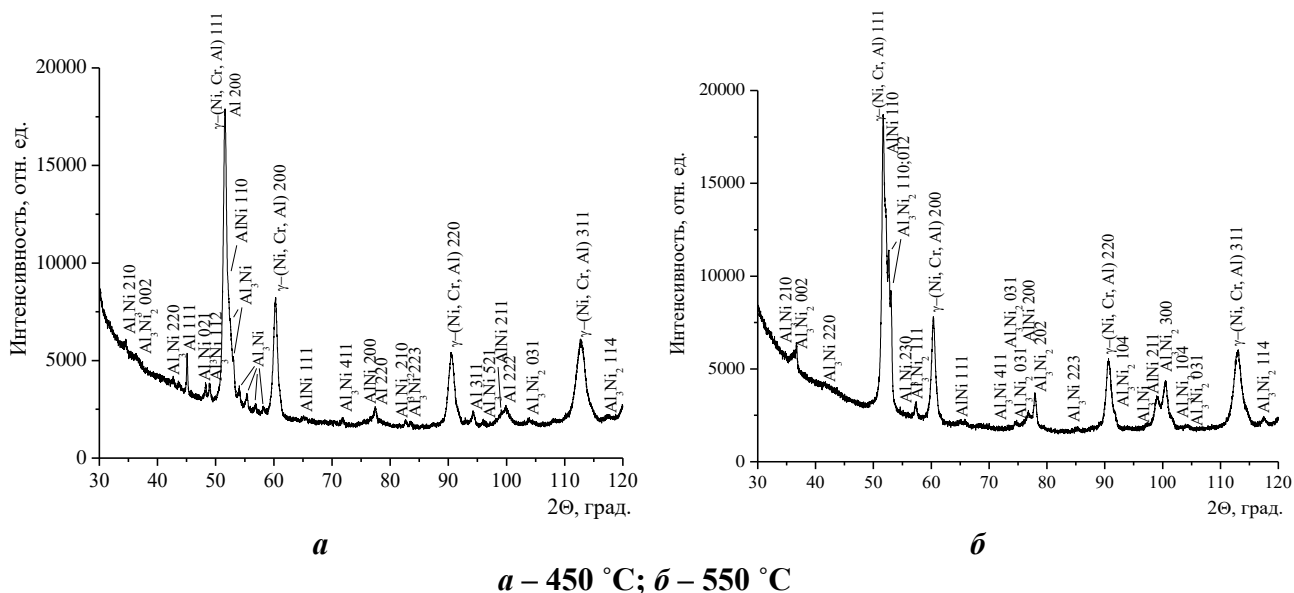


Рисунок 6 – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK_α) от поверхностных слоев (Ni-Cr)-Al покрытия после отжига при различных температурах в течение 10 часов

В четвертой главе приведены триботехнические характеристики композиционных покрытий Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al при трении без смазочного материала и со смазочным материалом И-20 в исходном состоянии, а также после отжига по различным режимам (рисунок 7).

Установлено, что износостойкость Fe-Al покрытия в условиях трения без смазочного материала и трения со смазочным материалом выше в 3,60 и 1,25 раза, соответственно, по сравнению с покрытием из стали 08Г2С (рисунок 7 а, г). Повышенная износостойкость композиционного покрытия связана с низким содержанием оксидов железа (5-8 об.%), образовавшихся в нем в процессе

напыления, а также с твердорастворным упрочнением алюминиевых и стальных частиц.

Отжиг Fe-Al композиционного покрытия при 530 °С в течение 1 часа приводит к повышению его износостойкости в условиях трения без смазочного материала в 3,10 раза и трения со смазочным материалом в 1,35 раза по сравнению с Fe-Al покрытием в исходном состоянии (рисунок 7 а, г). Коэффициент трения (μ) Fe-Al покрытия при трении без смазочного материала составлял 0,60-0,75, а со смазочным материалом 0,06-0,07. Возрастание износостойкости композиционного покрытия в результате термической обработки связано с его дисперсионным упрочнением интерметаллидными соединениями AlFe, AlFe₃ и Al₅Fe₂, Al₃Fe, Al₁₃Fe₄.

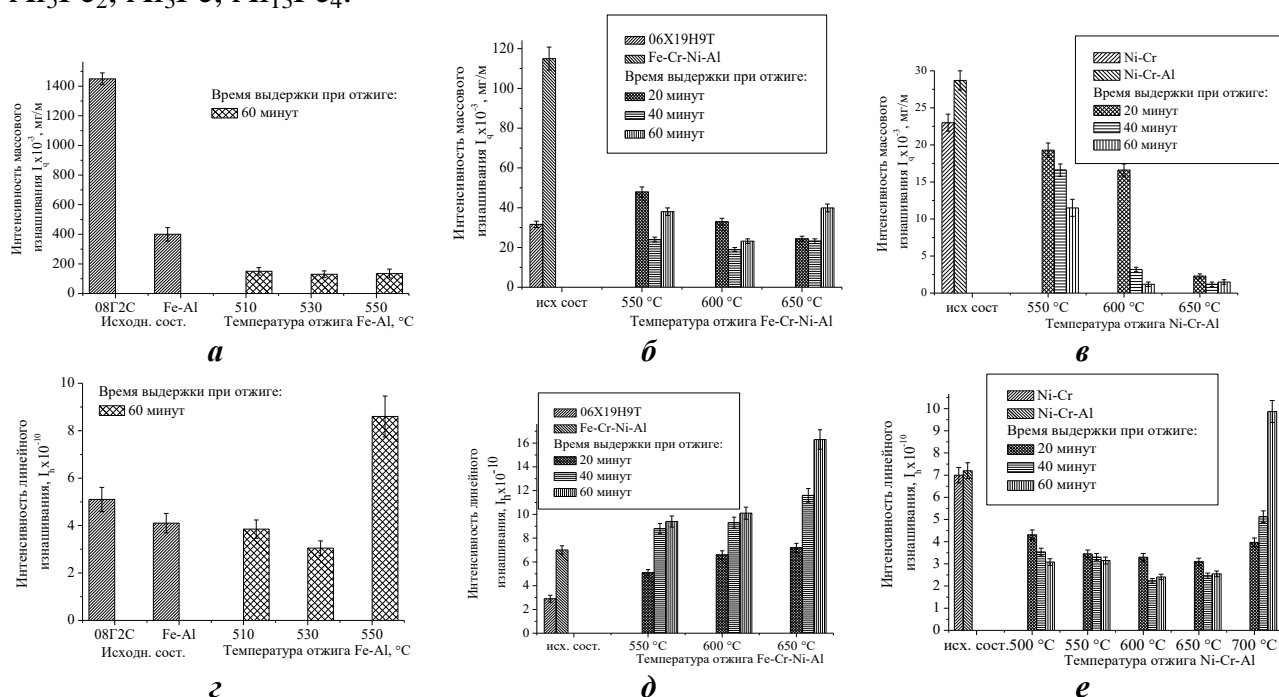


Рисунок 7 – Интенсивность массового изнашивания при трении без смазочного метериала (а, б, в) и интенсивность линейного изнашивания при трении со смазочным материалом (г, д, е) покрытий Fe-Al (а, г), (Fe-Cr-Ni)-Al (б, д), (Ni-Cr)-Al (в, е) в исходном состоянии, а также подвергнутых отжигу при различных температурах и времени выдержки

Установлено, что износостойкость (Fe-Cr-Ni)-Al покрытия в условиях трения без смазочного материала и трения со смазочным материалом И-20 ниже в 3,7 и 2,4 раза, соответственно, по сравнению с покрытием из стали 06X19H9T (рисунок 7 б, д). Пониженная износостойкость композиционного покрытия по сравнению с покрытием из аустенитной стали, связана с наличием в фазовом составе композита большого количества α -Fe. Известно, что покрытие из стали 06X19H9T содержит преимущественно аустенитную фазу γ -Fe, которая имеет высокое сопротивление изнашиванию за счет протекания в ней деформационно-активированного мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения при трении, приводящего к существенному повышению микротвердости и износостойкости поверхностных слоев покрытия.

Термическая обработка (Fe-Cr-Ni)-Al композиционного покрытия при температурах 550-650 °С в течение 20-60 минут приводит к повышению его износостойкости в условиях трения без смазочного материала и трения со смазочным материалом в 2,40-6,20 раза ($\mu \approx 0,50-0,74$) и в 1,05-1,30 раза ($\mu \approx 0,10-0,12$), соответственно, по сравнению с исходным состоянием (рисунок 7 б, д). Показано, что повышение износостойкости, подвергнутого отжигу (Fe-Cr-Ni)-Al покрытия, связано с его упрочнением за счет образования интерметаллидных фаз AlFe, AlFe₃ и Al₁₃Fe₄, Al₅Fe₂. Некоторое понижение износостойкости покрытий после отжига при повышенных температурах связано с формированием в покрытиях большого количества пор в процессе термической обработки, что может способствовать ускоренному зарождению трещин при трении и приводить к интенсивному разрушению поверхностных слоев покрытий.

Установлено, что износостойкость (Ni-Cr)-Al покрытия в условиях трения без смазочного материала ниже в 1,20 по сравнению с покрытием из сплава Х20Н80 (рисунок 7 в). Последнее связано с присутствием в композите непрочных алюминиевых частиц, которые являются центрами зарождения и распространения микротрещин в покрытиях при трении, что способствует разрушению композиционного материала покрытия.

Износостойкость в условиях трения без смазочного материала и со смазочным материалом (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия, подвергнутого отжигу при 500-700 °С в течение 20-60 минут, повышается в 1,7-24,0 ($\mu \approx 0,60-0,83$) и 1,3-3,2 раза ($\mu \approx 0,08-0,10$), соответственно, по сравнению с исходным состоянием (рисунок 7 в, е). Установлено, что повышение износостойкости покрытий обусловлено образованием в них интерметаллидных фаз AlNi, AlNi₃ и Al₃Ni₂, Al₃Ni.

Для установления режимов термической обработки, обеспечивающих максимальную износостойкость (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al покрытий, разработаны экспериментально-статистические математические модели, описывающие зависимости интенсивности их массового и линейного изнашивания от температуры и времени выдержки при отжиге. В результате анализа уравнений регрессии и поверхности отклика зависимостей интенсивностей изнашивания (рисунок 8) установлено, что максимальная износостойкость (Fe-Cr-Ni)-Al композиционного покрытия в условиях трения без смазочного материала достигается в результате отжига в интервале температур 580-590 °С в течение 40-45 минут (рисунок 8 а). Максимальная износостойкость (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия при трении без смазочного материала достигается после отжига при температурах 630-640 °С и времени выдержки 40-50 минут (рисунок 8 б), а в условиях трения со смазочным материалом после отжига при 580-600 °С в течение 40-50 минут (рисунок 8 в).

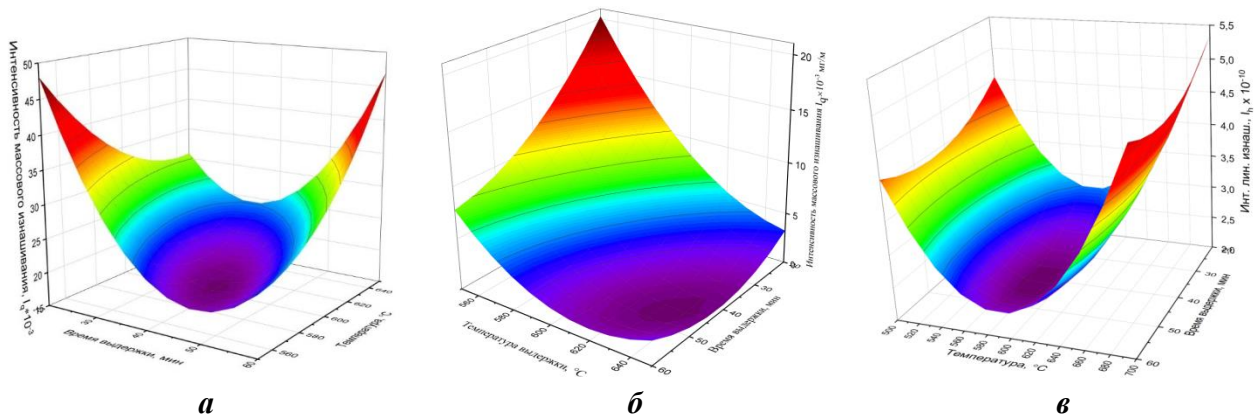


Рисунок 8 – Зависимость интенсивности массового изнашивания при трении без смазочного материала (а, б) и интенсивности линейного изнашивания при трении со смазочным материалом (в) покрытия (Fe-Cr-Ni)-Al (а) и (Ni-Cr)-Al (б, в) от температуры и времени отжига

В пятой главе приведены разработанные рекомендации по выбору материалов для высокоскоростной металлизации композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al, а также их последующего отжига, обеспечивающие повышение износо- и коррозионной стойкости покрытий. Отмечено, что стоимость 1 кг композиционного покрытия (Fe-Cr-Ni)-Al до ≈ 2 раз ниже по сравнению со стоимостью покрытий из хромо-никелевых аустенитных сталей, при этом стойкость к коррозионному разрушению композиционного покрытия повышается в 1,6 раза. Показано, что износостойкость покрытия (Ni-Cr)-Al (в исходном состоянии) при трении без смазочного материала выше, чем у Fe-Al покрытия в 13,9 раза и в 4,0 раза по сравнению с (Fe-Cr-Ni)-Al покрытием.

На основе представленных рекомендаций разработан типовой технологический процесс напыления и отжига (Ni-Cr)-Al покрытия (ТП № 01271.0041.000).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертационной работы

1. Исследованы структура, фазовый состав, адгезионная прочность и коррозионная стойкость композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al. Установлено, что контактное взаимодействие расплавленных компонентов приводит к их частичному смешению и образованию частиц железо-алюминиевого сплава переменного состава, что приводит к снижению окисления стальных частиц. Показано, что Fe-Al композиционное покрытие содержит пониженное количество оксидов железа (5-8 об.%) по сравнению с покрытием из стали 08Г2С (≈ 25 об.%). Установлено, что частичное смешение компонентов на стадии формирования (Fe-Cr-Ni)-Al композиционного покрытия из аустенитной хромоникелевой стали 06X19H9T и алюминиевого сплава АД1 приводит к образованию большого количества метастабильной фазы α -Fe

(≈ 30 об.%), что связано с сильным ферритизирующим действием алюминия в стальных частицах. Показано, что Fe-Al композиционное покрытие имеет в 4,2 раза более высокую коррозионную стойкость по сравнению с покрытием из стали 08Г2С, а покрытие состава (Fe-Cr-Ni)-Al - в 1,6 раза более высокую коррозионную стойкость по сравнению с покрытием из стали 06Х19Н9Т [1; 2; 4-6; 10; 11; 14].

2. Установлены закономерности формирования структуры и фазового состава Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al композиционных покрытий при отжиге в интервале температур 350-920 °С и выдержке в течение 1-10 часов. Показано, что отжиг Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al композиционных покрытий приводит к реакционной диффузии во множестве диффузионных пар с различным соотношением содержания компонентов, что сопровождается одновременным образованием интерметаллидных соединений $AlFe$, $AlFe_3$ и Al_5Fe_2 , $Al_{13}Fe_4$, Al_3Fe , (до ≈ 60 об. %), а также $AlNi$, $AlNi_3$ и Al_3Ni_2 , Al_3Ni (до ≈ 50 об.%), распределенных случайным образом в объеме покрытий. Установлено, что отжиг композиционных покрытий приводит к повышению пористости до 7-50 об. %, а также повышению адгезионной прочности на 10-40 % [1; 3-5; 7; 9; 12; 13].

3. Показано, что образование интерметаллидных соединений в композиционных покрытиях при отжиге приводит к изменениям их твердости и микротвердости. Микротвердость и твердость Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al композиционных покрытий, подвергнутых отжигу в интервале температур 510 - 650 °С в течение 20 - 60 минут, повышаются в 1,2 - 1,7 и в 1,2 - 1,4 раза, соответственно, по сравнению с исходным состоянием [1; 4; 7].

4. Изучены триботехнические характеристики в условиях трения без смазочного материала и при трении со смазочным материалом И-20 для композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al в исходном состоянии и подвергнутых отжигу в интервале температур 500-700 °С в течение 20-60 минут. Показано, что отжиг Fe-Al покрытия при 530 °С в течение 1 часа приводит к повышению его износостойкости при трении без смазочного материала до $\approx 3,1$ раз и при трении со смазочным материалом до $\approx 1,35$ раз по сравнению с исходным состоянием [1; 2; 8; 15].

Отжиг (Fe-Cr-Ni)-Al композиционного покрытия при температурах 550 - 650 °С в течение 20 - 60 минут приводит к повышению его износостойкости при трении без смазочного материала от 2,4 до 6,2 раз и при трении со смазочным материалом в 1,05 - 1,3 раза по сравнению с исходным состоянием [8; 11].

Отжиг (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия при 500 - 700 °С в течение 20 - 60 минут приводит к повышению его износостойкости в условиях трения без смазочного материала и трения со смазочным материалом от 1,7 до 24,0 раз и от 1,3 до 3,2 раз, соответственно, по сравнению с исходным состоянием [3; 7; 12].

5. На основании разработанной экспериментально-статистической математической модели получены уравнения регрессии зависимостей интенсивности массового и линейного изнашивания от температуры и продолжительности выдержки при отжиге (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al композиционных покрытий. Установлено, что максимальная износостойкость при трении без смазочного материала (Fe-Cr-Ni)-Al покрытия достигается после его отжига при температурах 580 - 590 °С с выдержкой в течение 40 - 45 минут, а для (Ni-Cr)-Al покрытия - в результате отжига при температурах 630 - 640 °С и времени выдержки 40 - 50 минут. При трении со смазочным материалом максимальная износостойкость (Ni-Cr)-Al покрытия достигается в результате отжига при 580 - 600 °С в течение 40 - 50 минут [3; 7].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Установленные закономерности формирования структуры, фазового состава и свойств композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al при напылении, а также в результате их термической обработки, могут быть использованы при выборе материалов для высокоскоростной металлизации и выборе режимов отжига композиционных покрытий, содержащих алюминий. Проведенные исследования композиционных покрытий дают представление о возможности повышения их эксплуатационных свойств (износостойкости, коррозионной стойкости), что расширяет область применения покрытий данного типа.

Термическая обработка композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al приводящая к повышению их физико-механических свойств, перспективна для упрочнения элементов пар трения, а также для получения дешевых износостойких покрытий.

Разработанные рекомендации по выбору материалов для напыления и режимам отжига композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al являлись основой для разработки типового технологического процесса напыления и отжига (Ni-Cr)-Al покрытия (ТП № 01271.0041.000), который используется в НП ООО «МАД» при изготовлении запасных частей для оборудования высокоскоростной металлизации, в частности повышения их износо- и коррозионной стойкости.

Результаты проведенных исследований могут быть применены в учебном процессе в учреждениях образования при подготовке специалистов технического профиля различного уровня.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах, входящих в перечень ВАК

1. Влияние отжига на структурно-фазовое состояние и износостойкость газотермических покрытий из железо-алюминиевых псевдосплавов / В.А. Ку-

кареко, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик, Е.В. Астрашаб, А.В. Сосновский // Актуальные вопросы машиноведения. – 2019. – С. 294–298.

2. Фазовое состояние и триботехнические свойства газотермического покрытия из псевдосплава «08Г2С+АК12», подвергнутого отжигу по различным режимам / Е.В. Астрашаб, А.Н. Григорчик, М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко // Актуальные вопросы машиноведения. – 2020. – С. 353–356.

3. Влияние температуры и времени отжига на износостойкость покрытий из псевдосплава на основе Ni-Cr-Al, напыленных методом высокоскоростной металлизации / Е.В. Астрашаб, А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский // Трение и износ. – 2020. – № 5 (41). – С. 538–544.

4. Влияние отжига на структурно-фазовое состояние и свойства газотермического покрытия из псевдосплава Al-Fe-Cr-Ni, полученного методом высокоскоростного распыления проволочных материалов / Е.В. Астрашаб, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2021. – № 4 (57). – С. 71–77.

5. Структурно-фазовый состав газотермического покрытия из Fe-Cr-Ni-Al-псевдосплава, подвергнутого отжигу / М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко, Ю.С. Коробов, Е.В. Астрашаб, А.Н. Григорчик // Литье и металлургия. – 2021. – № 4. – С. 112–115.

6. Структурно-фазовое состояние и коррозионная стойкость покрытий из псевдосплавов Fe-Al, Fe-Cr-Ni-Al и Ni-Cr-Al, напыленных методом гиперзвуковой металлизации / Е.В. Астрашаб, А.Н. Григорчик, М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко, О.И. Посылкина // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 2 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. Обработка металлов давлением. – 2022. – С. 8–15.

Статьи в научных журналах иностранных государств

7. Heat treatment of hypersonic metallization coatings from false alloys on the basis of alloy Ni80Cr20 / E. Astrashab, A. Grigorchik, M. Belotserkovsky, V. Kukareko // Scientific Journal of Gdynia Maritime University. – 2020. – № 116. – P. 7–14.

8. Износостойкость газотермических покрытий из сталей и псевдосплавов различных составов / В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик, Е.В. Астрашаб // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – Т. 16, № 8. – С. 371–375.

9. Высокотемпературная термическая обработка газотермических покрытий из псевдосплава «Fe-Al» / А.Н. Григорчик, Е.В. Астрашаб, В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.В. Сосновский // Письма о материалах. – 2021. – Т. 11 (2). – С. 198–203.

10. Коррозионная стойкость газотермических покрытий, напыленных методом высокоскоростной металлизации / А.Н. Григорчик, Е.В. Астрашаб, В.А.

Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.В. Сосновский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Том 17, № 4. – С. 176–180.

11. Влияние алюминия на структурно-фазовое состояние, коррозионную стойкость и трибомеханические свойства композиционных покрытий, полученных высокоскоростной металлизацией / А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко, Е.В. Астрашаб, М.А. Белоцерковский, А.В. Сосновский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18, № 1. – С. 18–23.

Статьи в сборниках научных трудов и материалов конференций

12. Влияние времени отжига газотермических покрытий из псевдосплава «Х20Н80+АД-1» на его структурно-фазовое состояние и твердость / М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко, А.Н. Григорчик, Е.В. Астрашаб // Инновационные технологии в машиностроении [электронный ресурс]: электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технического парка Полоцкого государственного университета, 21-22 апр. 2020г. / под ред. В.К. Шелега и др. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2020. – С. 87–90.

13. Астрашаб Е.В., Григорчик А.Н. Адгезионная прочность газотермических покрытий из Al и Ni-Cr-Al псевдосплавов, напыленных методом высокоскоростной металлизации // Перспективные материалы и технологии: материалы международного симпозиума, Минск, 23 - 27 августа 2021 г. / под. ред. В.В. Рубаника. – Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации». – 2021. – С. 37–39.

14. Астрашаб Е.В., Григорчик А.Н. Коррозионная стойкость газотермических покрытий на основе Fe-Al в водном растворе NaCl // Современные технологии для заготовительного производства [Электронный ресурс]: сборник научных работ Республиканской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов МТФ БНТУ, 14 апреля 2021 г. / сост. А.П. Бежок. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 59–61.

Патенты на изобретение

15. ЕА 039515 В1, 04.02.2022.



РЕЗЮМЕ

Астрашаб Евгений Викторович

Структурно-фазовые превращения в материалах систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al при получении износо- и коррозионностойких покрытий для деталей машиностроения

Ключевые слова: композиционные материалы, высокоскоростная металлизация, структура, фазовый состав, микротвердость, термическая обработка, износостойкость.

Цель работы: изучение структурно-фазовых превращений в материалах систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al при получении износо- и коррозионностойких покрытий для деталей машиностроения, а также разработка рекомендаций по выбору материалов покрытий, режимов их отжига с целью повышения эксплуатационных свойств.

Методы исследования: металлография, рентгеноструктурный и рентгенофлуоресцентный анализ, измерение твердости и микротвердости, исследование коррозионной стойкости, триботехнические испытания.

Полученные результаты и их новизна: установлены закономерности формирования структуры, фазового состава при получении композиционных покрытий на основе систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al. Исследованы структурно-фазовые превращения, протекающие при отжиге композиционных покрытий. Обнаружены особенности диффузионного взаимодействия частиц композиционных покрытий при напылении и последующей термической обработке. Установлено, что при отжиге Fe-Al и (Fe-Cr-Ni)-Al покрытий образуются упрочняющие железо-алюминиевые интерметаллидные соединения $AlFe$ и $AlFe_3$, а также Al_5Fe_2 , $Al_{13}Fe_4$, Al_3Fe . Показано, что отжиг (Ni-Cr)-Al покрытия приводит к образованию в нем никель-алюминиевых интерметаллидных соединений $AlNi_3$, $AlNi$ и Al_3Ni_2 , Al_3Ni . Установлены закономерности изменений износостойкости и твердости композиционных покрытий Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al в зависимости от режимов их термической обработки. Установлено, что образование интерметаллидных соединений в покрытиях приводит к повышению их триботехнических характеристик.

Рекомендации по использованию и область применения: полученные в работе результаты могут быть использованы при выборе материалов для высокоскоростной металлизации, выборе режимов отжига композиционных покрытий содержащих алюминий, а также для повышения защитных свойств и износостойкости покрытий, использующихся в машиностроении.

РЭЗІЮМЭ

Астрашаб Яўген Віктаравіч

Структурна-фазавыя ператварэнні ў матэрыялах сістэм Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al і (Ni-Cr)-Al пры атрыманні зноса- і каразійнатрывалых пакрыццяў для дэталей машынабудавання

Ключавыя словы: кампазіцыйныя матэрыялы, газатэрмічныя пакрыцці, структура, фазавы склад, мікрацвёрдасць, тэрмічная апрацоўка, зносаатрываласць.

Мэта працы: вывучэнне структурна-фазавых ператварэнняў у матэрыялах сістэм Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al і (Ni-Cr)-Al пры атрыманні зноса- і каразійнатрывалых пакрыццяў для дэталей машынабудавання, а таксама распрацоўка рэкамендацый па выбары матэрыялаў пакрыццяў, рэжымаў іх адпалу дзеля павышэння эксплуатацыйных уласцівасцяў.

Метады даследавання: металаграфія, рэнтгенаструктурны і рэнтгенафлуарэсцэнтны аналіз, вымярэнне цвёрдасці і мікрацвёрдасці, даследаванне каразійнай ўстойлівасці, трыбатэхнічныя выпрабаванні.

Атрыманая вынікі і іх навізна: устаноўлены заканамернасці фарміравання структурна-фазавага стану пры напыленні газатэрмічных Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al і (Ni-Cr)-Al кампазіцыйных пакрыццяў. Даследаваны структурна-фазавыя ператварэнні, якія праходзяць пры адпале кампазіцыйных пакрыццяў. Выяўлены асаблівасці дыфузійнага ўзаемадзеяння часціц кампазіцыйных пакрыццяў пры напыленні і наступнай тэрмічнай апрацоўцы. Устаноўлена, што пры адпале Fe-Al і (Fe-Cr-Ni)-Al пакрыццяў вылучаюцца ўмацавальныя жалеза-алюмініевыя інтэрметалідныя злучэнні Al_5Fe_2 , $Al_{13}Fe_4$, Al_3Fe , $AlFe$ і $AlFe_3$. Паказана, што адпал (Ni-Cr)-Al пакрыцця прыводзіць да вылучэння ў ім нікель-алюмініевых інтэрметалідных злучэнняў Ni_2Al_3 , $NiAl$, Al_3Ni , Ni_3Al . Устаноўлены заканамернасці змяненняў зносаўстойлівасці і цвёрдасці кампазіцыйных пакрыццяў Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al і (Ni-Cr)-Al у залежнасці ад рэжымаў іх тэрмічнай апрацоўкі. Устаноўлена, што вылучэнне інтэрметалідных злучэнняў у пакрыццях прыводзіць да павышэння іх трыбатэхнічных характарыстык.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць ужывання: атрыманая ў працы вынікі могуць быць скарыстаны пры выбары матэрыялаў для высакахуткай металізацыі, выбары рэжымаў адпалу кампазіцыйных пакрыццяў якія змяшчаюць алюміній, а таксама для падвышэння ахоўных уласцівасцяў і зносаатрываласці пакрыццяў, што выкарыстоўваюцца ў машынабудаванні.

SUMMARY

Astrashab Evgeniy Viktorovich

Structural-phase transformations in materials of Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al and (Ni-Cr)-Al systems in obtaining wear- and corrosion-resistant coatings for machine-building parts

Keywords: thermal spraying coatings, high-speed metallization, composite materials, structure, phase composition, microhardness, heat treatment, wear resistance.

The purpose of the work: study of structural-phase transformations in materials of Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al and (Ni-Cr)-Al systems at obtaining wear- and corrosion-resistant coatings for machine-building parts, as well as development of recommendations on the choice of coating materials and their annealing modes in order to improve their operational properties.

Research methods: metallography, X-ray diffraction and X-ray fluorescence analysis, measurement of hardness and microhardness, study of corrosion resistance, tribotechnical tests.

The results obtained and their novelty: regularities of formation of the structure, phase composition during the production of composite coatings based on Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al and (Ni-Cr)-Al systems are established. Structural-phase transformations occurring during annealing of composite coatings have been studied. Features of the diffusion interaction of particles of composite coatings during deposition and subsequent heat treatment are found. It has been established that during the annealing of Fe-Al and (Fe-Cr-Ni)-Al coatings, strengthening iron-aluminum intermetallic compounds AlFe and AlFe_3 , as well as Al_5Fe_2 , $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$, Al_3Fe . It is shown that annealing of (Ni-Cr)-Al coating leads to the formation of nickel-aluminum intermetallic compounds AlNi_3 , AlNi and Al_3Ni_2 , Al_3Ni . Regularities of changes in wear resistance and hardness of Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al and (Ni-Cr)-Al composite coatings depending on their heat treatment modes are established. It has been established that the formation of intermetallic compounds in coatings leads to an increase in their tribotechnical characteristics.

Recommendations for use and scope: the results obtained in the work can be used in the choice of materials for high-speed metallization, the choice of annealing modes for composite coatings containing aluminum, as well as to improve the protective properties and wear resistance of coatings used in mechanical engineering.

Подписано в печать 11.11.2023.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,28. Тираж 60 экз. Заказ № 380.

ФТИ НАН Беларуси.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/12 от 21.11.2013.
220084, ул. Академика Купревича, 10, г. Минск.