

На правах рукописи



**Гусев Александр Игоревич**

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЗМЫ ПОВЫШЕНИЯ  
АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ,  
НАПЛАВЛЕННЫХ ПОРОШКОВЫМИ ПРОВОЛОКАМИ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новокузнецк – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный руководитель	Козырев Николай Анатольевич – доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Клименов Василий Александрович – доктор технических наук, профессор, федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский политехнический университет», заведующий кафедрой – руководитель отделения материаловедения на правах кафедры инженерной школы новых производственных технологий
	Попова Наталья Анатольевна – кандидат технических наук, федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», старший научный сотрудник лаборатории «Наноматериалы и нанотехнологии»
Ведущая организация	федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита состоится 25 января 2022 г. в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.252.04 ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42.

Факс (3843) 46-57-92

E-mail: d212\_252\_04@sibsiu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и на официальном сайте университета [www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru).

Автореферат разослан: «\_\_» ноября 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, д.х.н., профессор



Горюшкин В.Ф.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Большая часть рабочих поверхностей деталей технологического оборудования всего за два-три года теряет до 50 % своих эксплуатационных свойств, что приводит к значительным материальным потерям. Абразивный и ударно-абразивный износ характерен для деталей оборудования в горной, металлургической, строительной, сельскохозяйственной и других отраслях промышленности. Для защиты и восстановления сильно нагруженных деталей, работающих в таких условиях, широко применяются методы наплавки, которые приводят к многократному повышению функциональных свойств. Высокой эффективностью обладает электродуговая наплавка, которая в настоящее время является наиболее распространённой, поскольку позволяет обеспечить оптимальное соотношение свойств поверхности и объема материала детали. Электродуговая наплавка применяется не только для ремонта изношенных конструкций, но и для придания повышенных свойств (твердости, износо-, жаростойкости и др.) поверхностям новых изделий перед вводом их в эксплуатацию. Это обуславливает актуальность проведения новых исследований практического применения электродуговой наплавки для повышения функциональных свойств в том или ином конкретном случае, а также дальнейших теоретических и экспериментальных исследований механизмов упрочнения и защиты поверхностных слоев.

**Степень разработанности темы.** В последнее время значительные усилия направляются на дополнительное повышение эффективности наплавки путем разработки новых электродных материалов, обеспечивающих требуемые свойства поверхности. Наиболее перспективным направлением в области ремонтно-восстановительных работ изнашивающихся поверхностей деталей является использование электродуговой наплавки порошковыми проволоками.

Возможности повышения качества наплавленного слоя обусловлены, в частности, химическим составом самих порошковых проволок и, как следствие, формированием структурно-фазовых состояний получаемого при наплавке металла, соответствующих условиям эксплуатации обрабатываемых деталей. При этом большое значение имеет выявление и устранение дефектной структуры покрытий, приводящей к их преждевременному разрушению, обусловленному общим уровнем газонасыщенности, в частности концентрацией водорода.

Широкое распространение для ремонтных работ на горно-шахтном оборудовании, работающем в условиях абразивного и ударно-абразивного изнашивания, получили наплавочные проволоки системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo. В связи с этим продолжаются исследования по разработке новых составов порошковых проволок, в частности по изучению влияния углеродфторсодержащих компонентов, снижающих содержание водорода, а также Cr, Mo, Ni, W, V и Co на твердость и износостойкость наплавленных слоев.

**Цель и задачи работы.** Целью работы является установление физической природы, выявление механизмов и закономерностей повышения абразивной износостойкости и твердости электродуговых покрытий, наплавленных порошковыми проволоками системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Установить влияние химического состава наплавленных электродуговым способом покрытий на их физико-механические свойства. Научно обосновать выбор состава наплавочного материала системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo для износостойких покрытий.

2. Исследовать структурно-фазовые состояния наплавленных покрытий, сформированных порошковыми проволоками различного химического состава.

3. Установить физическую природу, закономерности и научно обосновать механизм влияния углеродфторсодержащей добавки к наплавочному материалу системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo на повышение его стойкости к ударно-абразивному износу.

4. Установить особенности механизмов упрочнения наплавленных покрытий, обусловленные содержанием в них карбидов металлов, твердых растворов и закалочными эффектами.

5. Разработать состав и способ получения нового износостойкого наплавочного материала, провести его апробирование и определить эффективность применения на примере деталей горно-шахтного оборудования.

**Научная новизна работы.** С использованием высокоинформативных методов современного физического материаловедения получены новые знания о строении, структуре, фазовом составе и физико-механических свойствах покрытий, наплавленных порошковыми проволоками электродуговым методом под флюсом.

1. Установлены закономерности и получены новые количественные данные по влиянию химического состава электродуговых покрытий системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo на их твердость и абразивную износостойкость.

2. Выявлены структурно-фазовые состояния электродуговых покрытий, сформированных порошковыми проволоками различного химического состава. Впервые установлены закономерности и научно обоснован механизм влияния углеродфторсодержащей добавки к наплавочному материалу системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo на повышение стойкости к абразивному износу.

3. Установлены механизмы упрочнения электродуговых покрытий, обусловленные формированием структуры, содержащей карбиды металлов, образованием твердых растворов и закалочными эффектами.

4. Разработан новый состав и способ получения износостойкого наплавочного материала для деталей горнодобывающей промышленности (патент РФ № 2641590).

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Углублены знания о физических процессах формирования структуры и свойств электродуговых покрытий, наплавленных с использованием порошковых проволок системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo, содержащих в качестве флюса техногенные отходы.

Апробирование электродуговых покрытий в условиях эксплуатации на горнодобывающих предприятиях региона показало их высокую эффективность использования для повышения срока службы лопастей шнека комбайна 4LS20. Применение электродуговых покрытий с использованием разработанной проволоки по сравнению с проволокой DRATEC Draht-Technik GmbH (Германия) марки DT-SG 600F позволило увеличить срок службы лопастей шнеков на 19,3 %. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и используются при

подготовке обучающихся по направлению 22.03.02 «Металлургия» направленность «Металлургия сварочного производства» и магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия», что подтверждается соответствующими актами.

**Методология и методы исследований.** Диссертация является продолжением исследований по обработке материалов концентрированными потоками энергии, проводимых в научной школе Сибирского государственного индустриального университета «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий». Для достижения поставленной цели в диссертации использован комплекс методов современного физического материаловедения: оптическая и растровая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ и рентгеноструктурный фазовый анализ, испытания на твердость и износостойкость. Формирование электродуговых покрытий проводили с применением сварочного трактора ASAW-1250. Химический состав наплавленных покрытий определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71. Содержание водорода в электродуговых покрытиях определяли с помощью хроматографа «Газохром 3101». Измерения твердости выполняли по методу Роквелла на твердомере ТК-14-250 по ГОСТ 9013 – 59. Абразивную износостойкость покрытий определяли посредством испытаний на износ на машине 2070 СМТ-1.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Зависимости, закономерности и механизм влияния химического состава металла электродуговых покрытий системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo на твердость и скорость износа наплавленных слоев. Установлено, что уменьшение содержания углерода в наплавленном слое при одновременном изменении содержания хрома, никеля, молибдена и других присутствующих в его составе элементов способствует укрупнению игл мартенсита и увеличению размера бывшего зерна аустенита. Углерод, марганец, хром, молибден, никель и в незначительной мере ванадий в исследуемых пределах одновременно повышают твердость наплавленного слоя и уменьшают скорость износа образцов. При этом низкая вязкость матрицы не позволяет удерживать на поверхности карбиды вольфрама, в результате чего износ осуществляется не по механизму равномерного истирания поверхности, а по механизму выкрашивания высокопрочных частиц карбидов из матрицы.

2. Положительное влияние введения в порошковую проволоку системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo углеродфторсодержащего материала (пыли газоочистки производства алюминия) взамен аморфного графита. Ее использование уменьшает концентрацию водорода, фактически исключает образование пор в электродуговых покрытиях, снижая содержание водорода в наплавленном металле. Новые количественные данные по влиянию углеродфторсодержащего материала, входящего в состав порошковой проволоки, на абразивную износостойкость электродуговых покрытий.

3. Новый состав электродуговых покрытий, масс. %: C ≤ 0,40, 0,8–0,9 Si, 1,4–1,5 Mn, 5,0– 6,0 Cr, 0,3–0,5 Mo, 0,15–0,30 Ni, H ≤ 1,5 ppm, и порошковой проволоки системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo с использованием углеродфторсодержащего материала (техногенных отходов – пыли газоочистки алюминиевого производства) (патент РФ № 2641590), обеспечивающие повышение износостойкости и срока службы деталей горношахтного оборудования.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обусловлена корректностью постановки задач исследования, комплексным подходом к их решению с использованием современных экспериментальных и теоретических методов современной физики конденсированного состояния и физического материаловедения, применением методов математического планирования эксперимента и математической статистики, согласованностью полученных опытных данных с результатами других исследований. Экспериментальные результаты работы получены с использованием аттестованного исследовательского оборудования и стандартных методик, подтверждаются их воспроизводимостью и согласованностью между собой.

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодёжь» (Новокузнецк, 2015–2019); VII Всероссийской научно-практической конференции для студентов и учащейся молодежи «Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении» (Томск, 2016); Международной научно-практической конференции «Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении» (Кемерово, 2017); Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Новокузнецк, 2017–2019); International Scientific and Research Conference on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (Novokuznetsk, 2017); International Scientific and Research Conference on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (Novokuznetsk, 2017); International Scientific-Practical Conference: Innovations in Fuel and Energy Complex and Mechanical Engineering (Kemerovo, 2017); IV Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов (Донецк, 2018); Международной конференции «Сварка в России – 2019: современное состояние и перспективы» (Томск, 2019).

Основное содержание диссертации опубликовано в 33-х печатных работах, в том числе в семи статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и в девяти статьях, индексируемых базами Scopus и Web of Science. Новизна предложенного технического решения защищена патентом Российской Федерации.

**Личный вклад автора** состоит в постановке цели и задач исследований, проведении лабораторных и промышленных экспериментов по исследованию влияния химического состава электродуговых покрытий на их структурно-фазовые состояния и физико-механические свойства, разработке состава получения нового износостойкого наплавочного материала, а также в обработке и обобщении результатов исследований, формулировании выводов и положений, выносимых на защиту, подготовке публикаций по теме диссертации.

**Соответствие паспорту научной специальности.** Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследований и научной новизне соответствует п. 1 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления» и п. 7 «Технические и технологические приложения физики

конденсированного состояния» паспорта специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Результаты работы используются аспирантами СибГИУ, апробированы и используются на горнодобывающих предприятиях региона. Использование результатов работы в производстве, учебном процессе и научной работе подтверждается соответствующими актами и справками.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения и приложения, всего 149 страниц, включая 38 рисунков, 23 таблицы и списка литературы из 136 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, показана степень ее разработанности, определены цель и задачи исследований, сформулирована научная новизна работы, показана практическая значимость, описаны методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлена структура работы.

**В первой главе** проанализировано влияние структуры, химического и фазового состава на твердость и износостойкость электродуговых покрытий, систематизированы сведения по их применению для повышения срока службы деталей машин. Проведен обзор основных материалов для формирования электродуговых покрытий и их характеристик. В результате проведенного анализа сформулированы и определены основные задачи исследования.

**Во второй главе** описаны применяемое оборудование, методы и методики экспериментальных исследований.

Наплавку пластин из стали 09Г2С размерами 200×150×10 мм проводили сварочным трактором ASAW-1250 в пять слоёв. Для наплавки использовали флюс АН-26С. Для проволоки диаметром 6 мм приемлемое качество наплавляемого валика получено при режиме: сила тока – 450 А, напряжение – 30 В, скорость сварки – 10 м/мин.

Химический состав наплавки определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71. В ряде образцов определение содержания углерода, серы и фосфора проводили химическими методами. Измерения содержания водорода проводили на хроматографе «Газохром 3101».

Металлографические исследования проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в диапазоне увеличений от 100 до 1000. Микроструктуру выявляли травлением образцов в 4 %-ном растворе  $\text{HNO}_3$  в этиловом спирте. Величину зерна определяли в соответствии с ГОСТ 5639 – 82 при увеличении 100. Дисперсность мартенсита оценивали при сопоставлении структуры с эталонами соответствующих шкал и размеров игл мартенсита с данными таблицы № 6 ГОСТ 8233 – 56. Определение длины игл мартенсита и размера пор осуществляли с помощью пакета прикладных программ для металлографических исследований Siam Photolab 700. Исследования структуры, элементного и фазового состава осуществляли методом сканирующей электронной микроскопии. Использовали прибор «LEO EVO 50». Анализ фазового состава проводили с использованием дифрактометра XRD-7000, Shimadzu, баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL.

Измерение твердости исследуемых образцов выполняли по методу Роквелла на твердомере модели ТК-14-250 путем вдавливания конического алмазного наконечника. Скорость истирания определяли путем испытаний на износ на машине 2070 СМТ-1 по схеме диск-колодка. При изучении зависимостей твердости и износостойкости электродуговых покрытий от их химического состава проводили многофакторный анализ.

**В третьей главе** приведены результаты исследований структуры и свойств электродуговых покрытий, сформированных с использованием порошковой проволоки системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo, содержащей в качестве флюса техногенные отходы. При разработке новой порошковой проволоки в качестве сравнения за аналог приняты порошковая проволока фирмы DRATEC Draht-Technik GmbH (Германия) марки DT-SG 600F, которая соответствует современным требованиям качества.

При выборе химического состава наплавки руководствовались получением мартенситной и аустенитной структур. Выбор значений компонентов проводили с использованием планируемого эксперимента. В качестве входных параметров принимали содержание в порошковой проволоке Si, Mn, Cr, Ni и Mo. Факторами планируемого эксперимента были содержания порошков ферросилиция марки ФС75, марганца Мн988, хрома восстановленного ПХ-1С, никеля ПНК-1Л5 и молибденового МПЧ. Анализ результатов эксперимента позволил выявить характер влияния химических элементов системы Si-Mn-Cr-Ni-Mo на твердость и скорость изнашивания наплавленного слоя.

Изготовление порошковой проволоки и последующую наплавку проводили сериями. В серии 1 в качестве источника углерода вводили аморфный графит. В серии 2 изменяли содержание никеля, в серии 3 – кобальта, в серии 4 – ванадия, причем вместо хрома вводили вольфрам, в 5-й серии – ванадия и хрома, в 6-й – изменяли содержание основных элементов при изменении углеродфторсодержащей добавки, в 7-й – изучали изменение структуры при введении вольфрама и кобальта, в 8-й – проводили оптимизацию состава и наплавку пластин для промышленных испытаний. Образец сравнения наплавливали проволокой DT-SG 600F.

В образцах 3, 4 серии 1 с граничными содержаниями углерода (0,09 и 0,34 %) и хрома (3,2 и 6,0 %) при минимальных количествах этих элементов формировалась феррито-перлитная структура с участками мартенсита и троостита, а при максимальных – структура дендритного типа, в которой размер мартенситных игл был меньше, а величина мартенситно-трооститных участков больше.

Поэтапное увеличение содержания никеля от 0,4 до 0,8 % в серии 2 (образцы 5–8) не изменяло ее фазового состава. В структуре присутствовали пластины и иглы мартенсита, а также выделения феррита, расположенные по границам дендритов. Средний размер игл мартенсита увеличивался с повышением содержания никеля от 4–7 до 7–9 мкм, при этом возрастала объемная доля феррита.

Повышение содержания кобальта от 0,05 до 0,20 % при концентрации углерода 0,20 % в серии 3 (образцы 9–12) привело к увеличению объемной доли феррита по границам бывших зерен аустенита. В структуре наблюдались участки троостита, а также более крупные по сравнению со структурой наплавки серии 2 с количеством углерода 0,27–0,45 % иглы и пластины мартенсита (до балла 7, с размерами 8–15 мкм). Кобальт не оказывал заметного влияния на твердость и аб-

разивный износ слоя, что связано с получением более вязкой, но менее твердой матрицы при отсутствии в матрице твердых частиц карбидов.

Введение вольфрама в серии 4 (образцы 13–16) приводило к формированию в слое феррито-перлитной структуры. Объемная доля и размер ферритных зерен, который изменялся в пределах 7–20 мкм, зависели от химического состава и технологических параметров наплавки. По их телу выделялись точечные включения карбидной фазы типа  $(Fe, W)_3C$ . При повышении концентрации вольфрама увеличивалась твердость металла, при этом снижалась его износостойкость. изнашивание осуществлялось по схеме выкрашивания высокопрочных частиц карбидов из матрицы. В результате в матрице образовывались трещины, способствующие дополнительному износу матрицы.

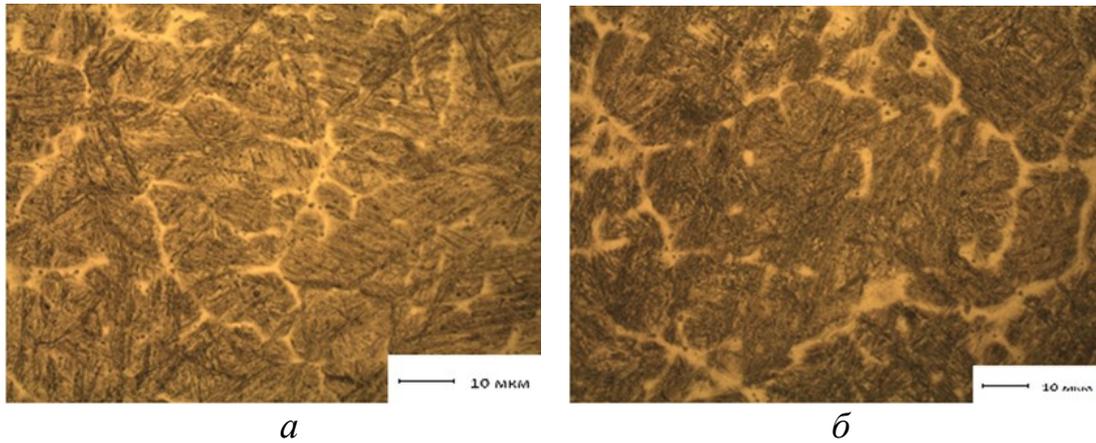
В серии 5 (образцы 131–136) слой с меньшим содержанием хрома (6,06 %) содержал большее количество ванадия (0,04 %) по сравнению с другими слоями, содержащими 0,02 % ванадия. Увеличение содержания хрома до 7 % не изменяло их микроструктуру с участками мелкоигльчатого мартенсита, отделенными друг от друга ферритными прослойками. При этом увеличивалась толщина прослоек и уменьшался размер бывших зерен аустенита, по которым они выделились. Размеры игл и пластин мартенсита оставались без изменения (балл 7).

Изменение содержания основных элементов и углеродфторсодержащей добавки в образцах 17–21 серии 6 показало, что увеличение содержания углерода до 0,17 % и хрома до 6 % приводит к формированию структуры средне- и крупноигльчатого мартенсита (балл 6) с участками феррита по границам зерен бывшего аустенита.

В серии 7 (образцы 22–24 с содержанием углерода 0,23–0,28 %) определено совместное влияние хрома и ванадия на микроструктуру слоев. Микроструктура слоя без вольфрама, но с присутствующими в составе 4 % хрома, представлял собой мартенсит с тонкими прослойками феррита. Размер мартенситных игл составлял 6–12 мкм (балл 7). Дополнительное введение вольфрама в количестве 4,66 % привело к получению мартенситной структуры с небольшим количеством участков феррито-перлитной структуры. Объемная доля феррита значительно увеличилась.

Для рационализации состава наплавленных слоев и проведения промышленных испытаний были наплавлены образцы 26 и 27 (серия 8). Образец 26, не содержащий вольфрам, имел мартенситную структуру с прослойками феррита по бывшим границам зерен аустенита (рисунок 1). Микроструктура образца 27, содержащего 6,5 % вольфрама, отличалась присутствием в основе участков мартенсита с феррито-перлитной структурой. Кроме того, по ферритным зернам были хорошо видны включения карбидов железа, хрома и вольфрама. Определение износостойкости образца 27 показало, что использование вольфрама в нем нецелесообразно, поэтому для промышленных испытаний использовали порошковую проволоку состава 26 (% масс.): C = 0,40, 0,87 Si, 1,48 Mn, 5,36 Cr, 0,56 Mo, 0,29 Ni; H = 1,4 ppm.

Оценка загрязненности наплавленных слоев неметаллическими включениями по ГОСТ 1778 – 70 установила присутствие в них силикатов недеформирующихся и оксидов точечных, не оказывающих влияния на износостойкость.



*a* – образец 26; *б* – образец 27

Рисунок 1 – Микроструктура наплавленного слоя

В образцах, наплавленных проволокой с повышенным содержанием хрома (9 %) и кремния (2,6 %) фирмы DRATEC Draht-Technik GmbH, наблюдается большее относительно других образцов с углеродфторсодержащей добавкой количество пор, а также неметаллических включений. Их микроструктура (рисунок 2) представляет собой мартенсит игольчатого и реечного типа, расположенный в бывших зернах аустенита. По границам зерен выделяются прослойки феррита. Средний размер мартенситных игл и реек составляет 4–9 мкм, а аустенитные зерна относятся к 7–8 баллу по стандартной шкале. Повышенное содержание в слое хрома при 0,4 % углерода приводит к формированию карбидов специального типа  $(Cr, Fe)_7C_3$ .

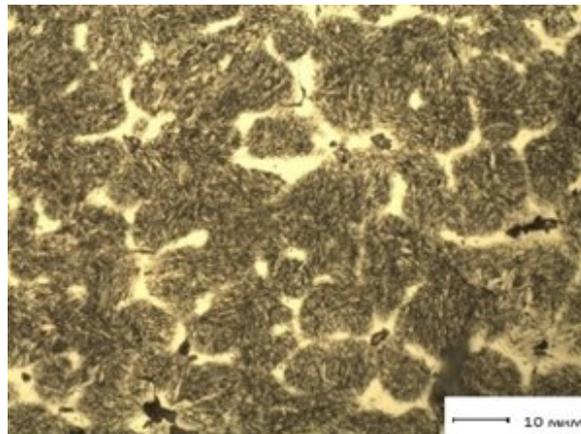
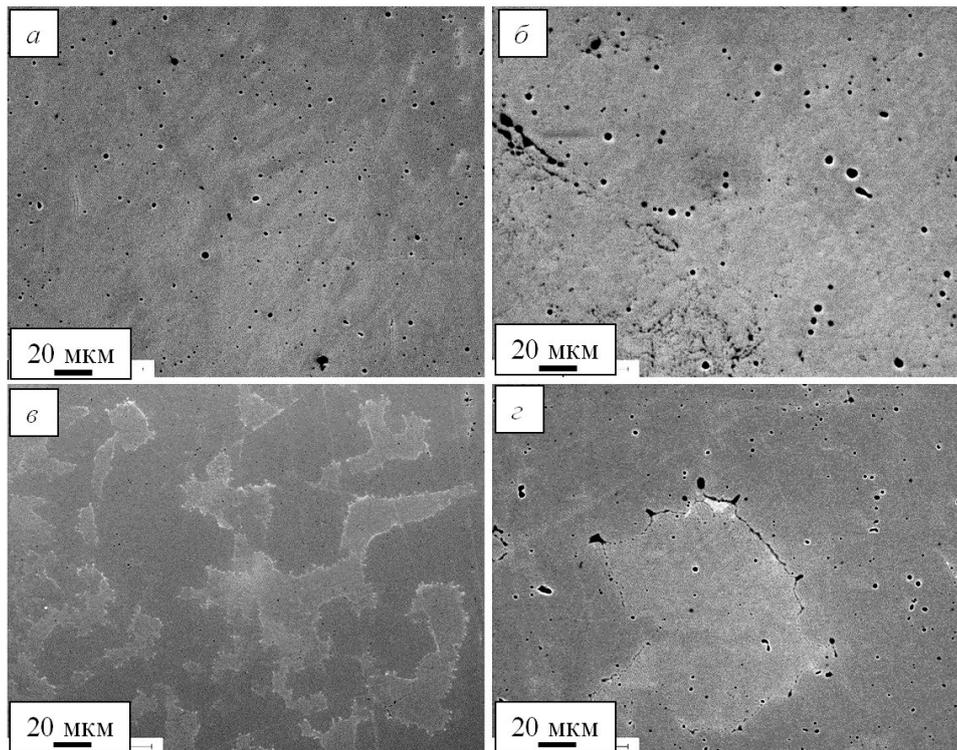


Рисунок 2 – Микроструктура наплавленного слоя проволокой марки DT-SG 600F

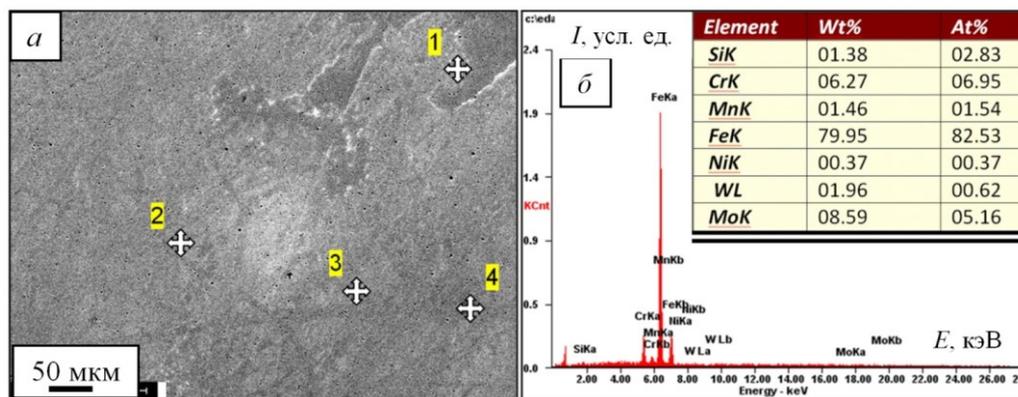
Общим для образцов 19 и 21 (рисунок 3) является наличие микропор округлой формы размерами в пределах от 1,5 до 7 мкм. Наблюдаются также крупные микропоры диаметром до 3,5 мм. Их большее количество выявлено в образце 19. Образец 21 имеет более выраженную дендритную структуру. Микрорентгено-спектральный анализ (рисунки 4 и 5) подтвердил максимальную степень легирования хромом, молибденом и вольфрамом. При этом концентрация вольфрама от точки к точке на поверхности образца 21 может изменяться более чем в три, а мо-

либдена – в два раза. Анализ элементного состава этого образца показал (таблица 1), что области дендритной кристаллизации (обозначенные на рисунке 4, *a* цифрами 1 и 4) обеднены, а междендритные пространства (темные области, обозначенные цифрами 2 и 3) обогащены легирующими элементами.



*a, б* – образец 19; *в, г* – образец 21

Рисунок 3 – Микроструктура поверхности образцов. Сканирующая электронная микроскопия

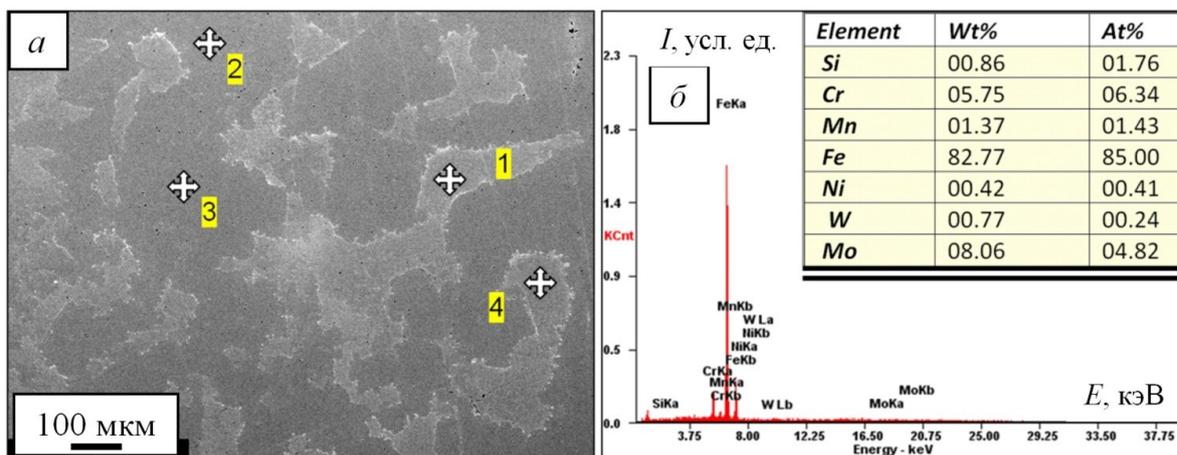


*a* – сканирующая электронная микроскопия; *б* – энергетические спектры, полученные методом «по площадям» с участка образца *a*

Рисунок 4 – Микроструктура поверхности образца 19

Основной фазой данных образцов является твердый раствор на основе  $\alpha$ -Fe (рисунок 6). Параметр кристаллической решетки образца 19 ( $a = 0,28766$  нм) и образца 21 ( $a = 0,28740$  нм) существенно больше, чем у чистого  $\alpha$ -Fe ( $a = 0,2866$  нм).

Дифракционная линия  $\alpha$ -Fe искажена (рисунок 6, участок указан стрелкой), что свидетельствует о наличии в стали включений второй фазы. Данный дифракционный максимум согласно карточке 04-016-7242 международной базы данных может принадлежать кристаллической решетке карбида хрома состава CrC. Методом рентгенофазового анализа определены параметр  $a$  кристаллической решетки и значения областей когерентного рассеяния сформированных фаз Fe и CrC (таблица 2).



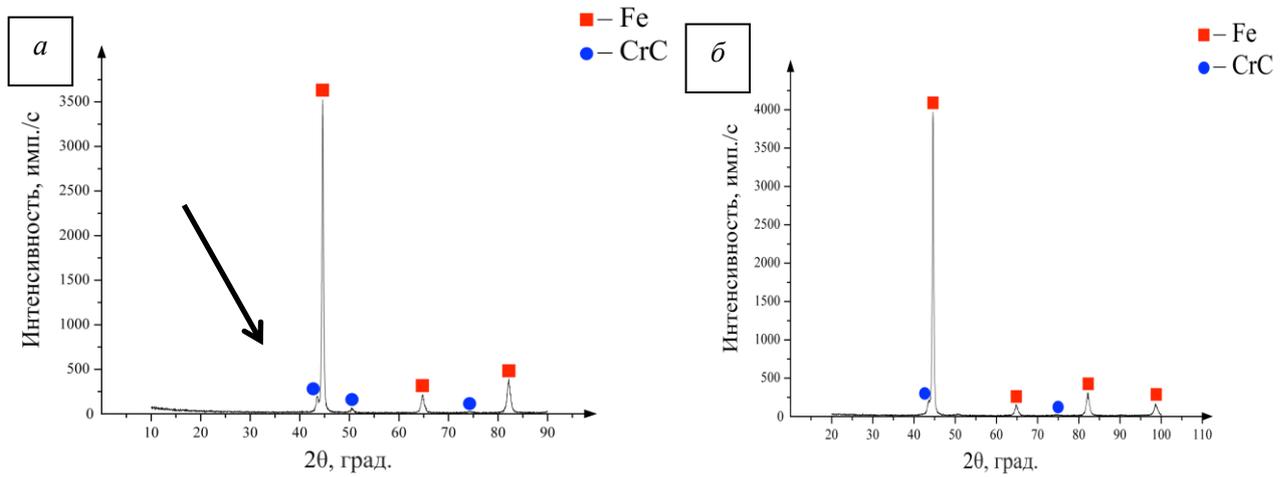
$a$  – сканирующая электронная микроскопия;  $b$  – энергетические спектры, полученные методом «по площадям» с участка образца  $a$

Рисунок 5 – Микроструктура поверхности образца 21

Таблица 1 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности образцов 19 (числитель) и 21 (знаменатель)

Элемент	Концентрация, масс. %				
	Вся площадь	Область 1	Область 2	Область 3	Область 4
Si (K)	1,26/0,86	1,32/0,69	1,12/0,84	1,49/0,5	1,6/0,43
Cr (K)	6,23/5,75	6,07/5,46	5,82/6,35	6,15/5,6	6,15/5,61
Mn (K)	1,48/1,37	1,45/1,26	1,32/1,44	1,28/1,58	1,19/1,48
Fe (K)	80,1/82,77	83,39/88,75	81,36/79,43	85,45/81,93	80,9/87,62
Ni (K)	0,30/0,42	0,18/–	–/0,27	0,16/0,52	0,18/0,14
W (L)	2,18/0,77	1,54/–	0,34/1,53	0,59/0,86	1,88/0,0
Mo (K)	8,45/8,06	6,05/3,84	10,04/10,14	4,88/9,01	8,1/4,72

Диаметр ямок излома в образце 19 колеблется в пределах от 0,5 до 75 мкм (рисунок 7,  $z$ ), а в образце 21 – от 0,25 (рисунок 6,  $b$ ) до 70 мкм (рисунок 8,  $z$ ). На изломах обоих образцов выявлены поверхностные слои, которые характеризуются малым диаметром ямок излома по сравнению с объемом образцов (рисунки 8,  $a$  и 8,  $z$ ). Толщина слоя в образце 21 (рисунок 8,  $a$ ) более чем в пять раз больше, чем в образце 19 (рисунок 7,  $a$ ),



*a* – образец 19; *б* – образец 21

Рисунок 6 – Дифрактограммы образцов 19 и 21

Таблица 2 – Результаты рентгенофазового анализа образцов

Образец	Обнаружен- ные фазы	Параметр кристалличе- ской решетки <i>a</i> , нм	ОКР, нм	Содержание фаз, % (масс.)
19	Fe	0,288	–	88,86
	CrC	0,361	158,7	11,14
21	Fe	0,287	140,76	67,46
	CrC	0,359	8,67	32,54

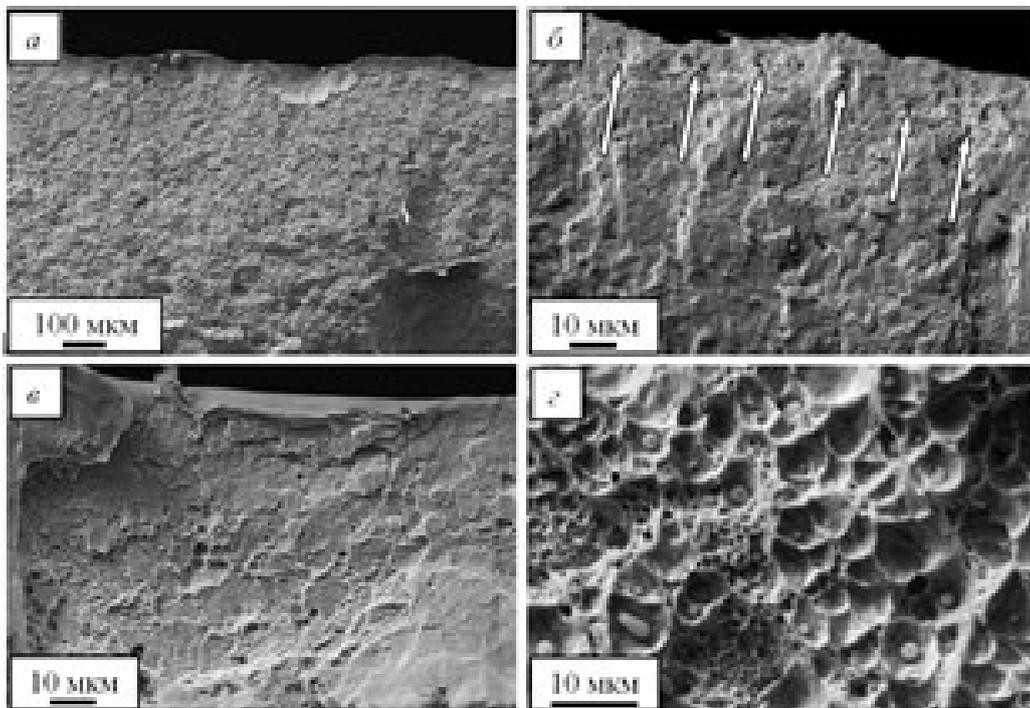


Рисунок 7 – Сканирующая электронная микроскопия поверхности излома образца 19

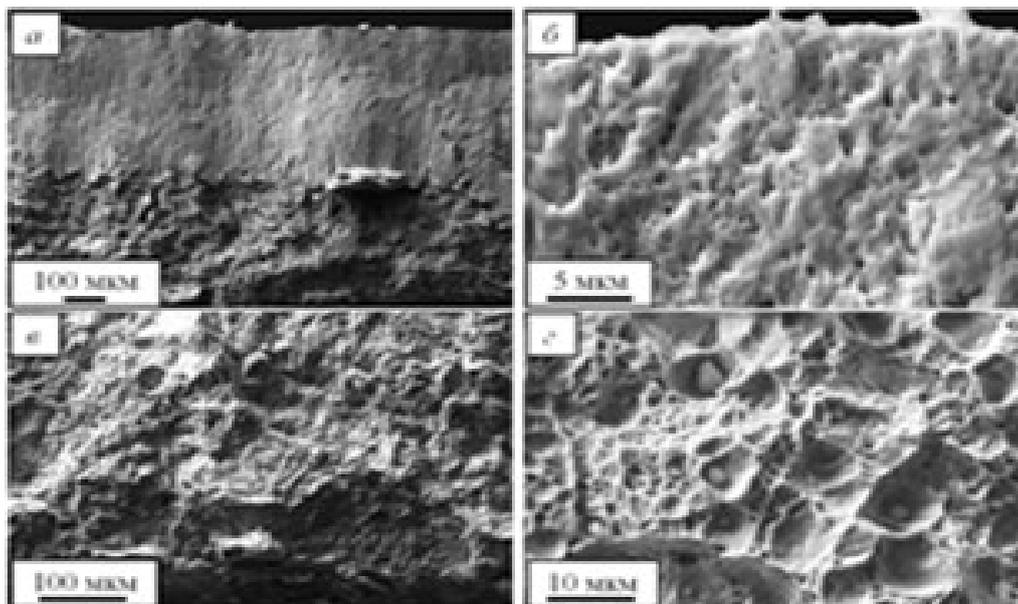


Рисунок 8 – Сканирующая электронная микроскопия поверхности излома образца 21

Анализ влияния химических элементов на стойкость к абразивному износу и твердость показал, что в исследуемых пределах углерод, марганец, хром, молибден, никель и в незначительной мере ванадий одновременно повышают твердость наплавленного слоя и уменьшают скорость изнашивания образцов. Увеличение содержания углеродфторсодержащей добавки вследствие образования HF позволяет снизить концентрацию водорода с  $4,3\text{--}4,6 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  при использовании аморфного графита до  $1,4\text{--}1,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ . Содержание водорода также незначительно увеличивает скорость изнашивания.

На рисунке 9 представлены значения скорости изнашивания и твердости электродуговых покрытий различного химического состава. Покрытия серии 4 с повышенным содержанием вольфрама и с феррито-перлитной структурой имеют невысокую твердость  $20\text{--}30 \text{ HRC}$  при скорости изнашивания  $(3,6\text{--}7,6) \cdot 10^{-5} \text{ г/об}$ . У покрытий с мартенситной структурой серии 2, легированных никелем, широкий разброс значений скорости изнашивания  $(1,4\text{--}7,1) \cdot 10^{-5} \text{ г/об}$  при твердости  $40\text{--}54 \text{ HRC}$ . Близкие значения износостойкости  $(2,2\text{--}2,5) \cdot 10^{-5} \text{ г/об}$  при больших уровнях твердости  $54\text{--}57 \text{ HRC}$  имеют электродуговые покрытия с мартенситной структурой серии 8. Наиболее низкие показатели износостойкости характерны для покрытий состава 3 серии 1. При твердости  $29\text{--}31 \text{ HRC}$  скорость изнашивания для всех исследуемых составов составляет  $9,1 \cdot 10^{-5} \text{ г/об}$ . Состав 3 имеет мартенситную структуру и минимальное (из всех исследуемых составов) содержание углерода и карбидообразующих элементов хрома и вольфрама.

Математико-статистическими методами определены зависимости твердости и износостойкости наплавленного слоя от массовой доли элементов, входящих в состав порошковых проволок системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Mo-Ni-V-Co как без, так и с учетом влияния водорода. Значения средней ошибки аппроксимации без учета водорода составили  $3,88$  и  $7,29\%$  для твердости и износа, а при введении в расчетные данные водорода –  $0,75$  и  $2,17\%$  соответственно. Полученные функциональные зависимости позволяют прогнозировать твердость и износостойкость наплавленного слоя при изменении его химического состава.

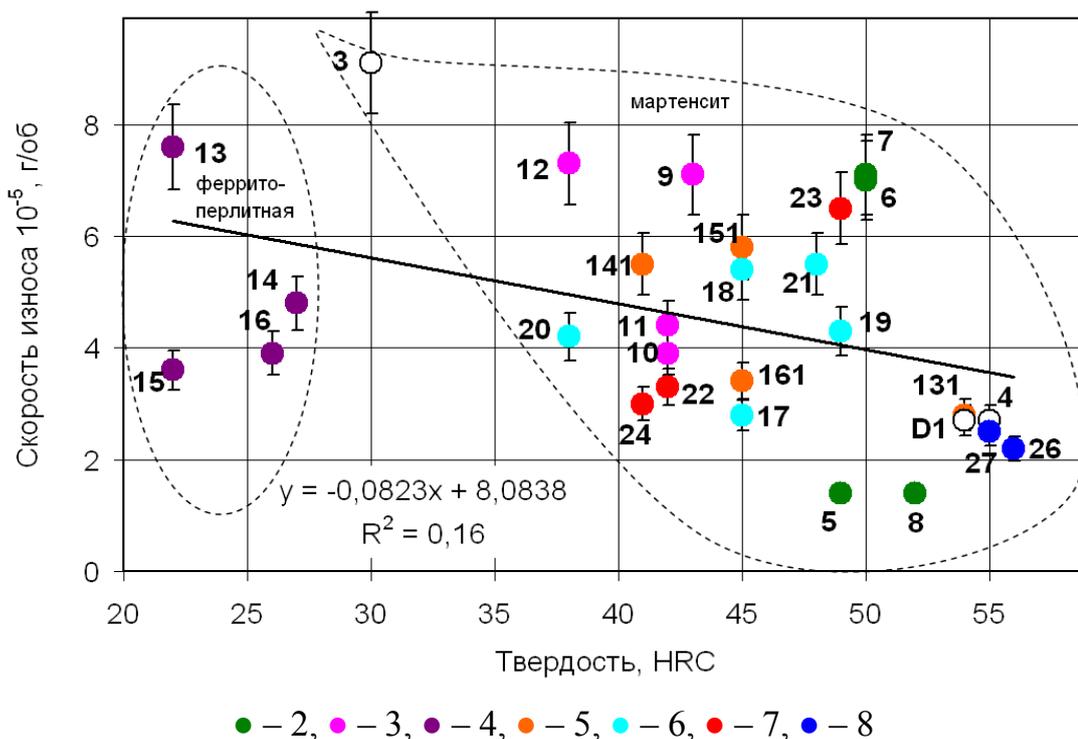


Рисунок 9 – Скорость изнашивания и твердость электродуговых покрытий исследованных серий образцов

По совокупности результатов исследования микроструктур, химического, компонентного, фазового составов, твердости и износостойкости, технологичности нанесения и анализа стоимости легирующих элементов электродуговых покрытий для практического применения запатентован (близкий к составу покрытия 26) следующий химический состав наплавленного металла, масс. %: C ≤ 0,40, 0,8–0,9 Si, 1,4–1,5 Mn, 5,0–6,0 Cr, 0,3–0,5 Mo, 0,15–0,30 Ni; H ≤ 1,5 ppm.

В четвертой главе представлены результаты промышленных испытаний, проведенных на ООО «Шахта Листвяжная» на шнеках комбайна JOY 4LS20. На лопасти шнека устанавливали пластины с электродуговым покрытием разработанного состава, наплавленным порошковой проволокой, содержащей в качестве флюса техногенные отходы. Нарботка шнеков за период испытания по опытной технологии составила 253654 т угля, а при наработке шнеков по используемой ранее технологии – 204698,7 т угля. Износостойкость покрытия, выполненного новой порошковой проволокой, на 19,3 % выше, чем покрытия, выполненного наплавочной проволокой марки DT-SG 600F. При этом стоимость ее изготовления по сравнению с затратами на приобретение проволоки марки DT-SG 600F меньше на 379,3 руб./кг.

## ВЫВОДЫ

1. Исследована микроструктура электродуговых покрытий различного химического состава. Установлено, что уменьшение содержания углерода в наплавленном слое при одновременном изменении содержания хрома, никеля, молибдена и других присутствующих в его составе элементов способствует укрупнению игл мартенсита и увеличению размера бывшего зерна аустенита.

2. Проведена оценка влияния химического состава металла на твердость и скорость износа наплавленных слоев. Установлено, что углерод, марганец, хром, молибден, никель и в незначительной мере ванадий в исследуемых пределах одновременно повышают твердость наплавленного слоя и уменьшают скорость износа образцов. При этом низкая вязкость матрицы не позволяет удерживать на поверхности карбиды вольфрама, в результате чего износ осуществляется не по механизму равномерного истирания поверхности, а по механизму выкрашивания высокопрочных частиц карбидов из матрицы.

3. Установлено положительное влияние введения в порошковую проволоку системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo углеродфторсодержащего материала (пыли газоочистки производства алюминия) взамен аморфного графита. Показано, что ее использование уменьшает концентрацию водорода, фактически исключает образование пор в электродуговых покрытиях, снижая содержание водорода в наплавленном металле. Содержание водорода в металле покрытия снижается с 4,3–4,6 см<sup>3</sup>/100 г при использовании аморфного графита до 1,4–1,5 см<sup>3</sup>/100 г (более чем в 3 раза) при использовании углеродфторсодержащего материала. Получены новые количественные данные по влиянию углеродфторсодержащего материала, входящего в состав порошковой проволоки, на абразивную износостойкость электродуговых покрытий.

4. Для практического применения, прогнозирования твердости и абразивной износостойкости электродуговых покрытий в зависимости от их элементного состава получены новые многофакторные зависимости.

5. По совокупности результатов исследования микроструктур, химического, компонентного, фазового составов, свойств (твердости и износостойкости) технологичности нанесения и анализа стоимости легирующих элементов для практического применения разработан новый состав электродуговых покрытий, масс. %: C ≤ 0,40, 0,8–0,9 Si, 1,4–1,5 Mn, 5,0–6,0 Cr, 0,3–0,5 Mo, 0,15–0,30 Ni, H ≤ 1,5 ppm, и порошковой проволоки системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo с использованием углеродфторсодержащего материала (техногенных отходов – пыли газоочистки алюминиевого производства) (патент РФ № 2641590).

6. Промышленные испытания электродуговых покрытий разработанного состава, проведенные в условиях ООО «Шахта Листвяжная» на шнеках комбайна JOY 4LS20, показали их перспективность и более высокие эксплуатационные свойства по сравнению с покрытиями, выполненными наплавочной проволокой фирмы DRATEC Draht-Technik GmbH (Германия) марки DT-SG 600F. Износостойкость и срок службы электродуговых покрытий разработанного состава на 19,3 % выше. Применение предлагаемой порошковой проволоки позволяет уменьшить себестоимость ремонтов горношахтного оборудования и снизить стоимость ее изготовления по сравнению с наплавочной проволокой фирмы DRATEC на 379,3 руб./кг.

7. Результаты исследований, выполненных в диссертации, внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и используются при подготовке бакалавров, обучающихся по направлению 22.03.02 «Металлургия» направленность «Металлургия сварочного производства» и магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия».

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ*

1. **Гусев, А. И.** Наплавка порошковыми проволоками C-Si-Mn-Mo-V-W и C-Si-Mn-Cr-Mo-V деталей горнорудного оборудования / **А. И. Гусев**, Н. В. Кибко, М. В. Попова и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60. – № 4. – С. 318–323.
2. Козырев, Н. А. Разработка новых порошковых проволок для наплавки деталей, работающих в условиях ударно-абразивного износа / Н. А. Козырев, **А. И. Гусев**, Р. Е. Крюков и др. // Черная металлургия. Бюл. научно-техн. и эконом. информ. – 2018. – Вып. 7 (1423). – С. 70–77.
3. **Гусев, А. И.** Разработка порошковой проволоки для наплавки деталей, работающих в условиях износа / **А. И. Гусев**, А. А. Усольцев, Н. А. Козырев и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61. – № 11. – С. 898–906.
4. **Гусев, А. И.** Влияние введения вольфрама и хрома на свойства металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Mo-Ni-V-Co / **А. И. Гусев**, Н. А. Козырев, Н. В. Кибко и др. // Заготов. производства в машиностроении. – 2019. – Т. 17. – № 2. – С. 56–60.
5. Осетковский, И. В. Сравнительный анализ абразивной износостойкости металла, наплавленного порошковыми проволоками систем Fe-C-Si-Mn-Ni-Mo-W-V и Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V / И. В. Осетковский, Н. А. Козырев, **А. И. Гусев** и др. // Заготов. производства в машиностроении. – 2019. – Т. 17. – № 5. – С. 198–202.
6. Козырев, Н.А. показатели новых порошковых проволок системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo / Н. А. Козырев, А. А. Усольцев, Р. Е. Крюков, **А. И. Гусев**, И. В. Осетковский // Черная металлургия. Бюл. научно-техн. и эконом. информ. – 2019. – Т. 75. – № 7. – С. 860–866.
7. Иванов, Ю. Ф. Структура, элементарный и фазовый состав износостойкой наплавки порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo / Ю. Ф. Иванов, **А. И. Гусев**, Д. А. Романов и др. // Фундам. проблемы соврем. материаловедения. – 2021. – Т. 18. – № 1. – С. 106–114.

### *Публикации в зарубежных изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science*

1. **Gusev, A. I.** Quality of metal deposited flux cored wire with the system Fe-C-Si-Mn-Cr-Mo-Ni-V-Co / **A. I. Gusev**, N. A. Kozyrev, I. V Osetkovskiy et al. // Key engineering materials. – 2017. – Vol. 736. – P. 2
2. Osetkovskiy, I. V. Influence of the cobalt additive on the flux cored wire of system Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V / I. V. Osetkovskiy, N. A. Kozyrev, **A. I. Gusev** et al. // Key engineering materials. – 2017. – Vol. 736. – P. 63
3. Osetkovskiy, I. V. Development of a wear-resistant flux cored wire of Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V system for deposit welding of mining equipment parts / I. V. Osetkovskiy, N. A. Kozyrev, R. E. Kryukov, A. A. Usoltsev and **A. I. Gusev** // International Scientific and Research Conference on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (KTDMUR2017), 6–9 June 2017, Novokuznetsk, Russian Federation. 2017. – Vol. 84. – P. 1–7.

4. **Gusev, A. I.** Study of the properties of flux cored wire of Fe-C-Si-Mn-Cr-Mo-Ni-V-Co system for the strengthening of nodes and parts of equipment used in the mineral mining / **A. I. Gusev**, N. A. Kozyrev, A. A. et al. // International Scientific and Research Conference on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (KTDMUR2017), 6–9 June 2017, Novokuznetsk, Russian Federation. – 2017. – Vol. 84. P. 1–5.
5. **Gusev, A. I.** Quality of Metal Deposited Flux Cored Wire with the System Fe-C-Si-Mn-Cr-Mo-Ni-V-Co / **A. I. Gusev**, N. A. Kozyrev, I. V. Osetkovskiy et al. // International Scientific-Practical Conference: Innovations in Fuel and Energy Complex and Mechanical Engineering (FEC-2017) 18–21 April 2017, Kemerovo, Russian Federation IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 253. – P. 1–7.
6. **Gusev, A. I.** Developing New Powder Wire for Surfacing Details Which Works in the Wear Resistance Conditions / **A. I. Gusev**, N. A. Kozyrev, I. V. Osetkovskiy, A. A. Usoltsev // Materials and processing Technology. Materials science forum. – 2018. – Vol. 927. – P. 126–133.
7. **Gusev, A. I.** Development of a flux-cored wire for surfacing mining equipment operating in the conditions of shock-abrasive wear / **A. I. Gusev**, N. A. Kozyrev, A. A. Usoltsev et al. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 206. – Article 012034.
8. **Gusev, A. I.** Flux-Cored Wire for the Surfacing of Parts Subject to Wear / **A. I. Gusev**, A. A. Usoltsev, N. A. Kozyrev et al. // Steel in Translation. – 2018. – Vol. 48. – No. 11. – P. 724–731.
9. Козырев, Н. А. Operational factors of new flux cored wires of the Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo system for surfacing of protective plates of shearer cutting drums / N. A. Kozyrev, A. A. Usoltsev, R. E. Kryukov, **A. I. Gusev**, I. V. Osetkovskiy // IOP Conf. Series: Earth and Environmental / Science International Scientific and Research Conference on Knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources 4–7 June 2019, SibSIU, Novokuznetsk, Russia. – 2019. – Vol. 377. – Article 0121022.

### *Патент РФ*

Пат. 2641590 РФ. МПК В23К 35/36, В23К 35/36. Порошковая проволока / Н. А. Козырев, **А. И. Гусев**, Г. В. Галевский, Р. Е. Крюков, И. В. Осетковский, А. А. Усольцев, О. А. Козырева; ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет». Заявл. 22.06.2016; опубл. 18.01.2018. Бюл. № 2.

Подписано в печать 23.11.2021 г.

Формат бумаги 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 1,16. Уч. изд. л. 1,10. Тираж 100 экз. Заказ 274.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»  
654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42  
Издательский центр СибГИУ