



ОТЗЫВ

официального оппонента **Якимов Николай Сергеевич**, кандидата технических наук, Главного металлурга ОАО «ЕПК Самара» на диссертационную работу Плесовских Алексея Юрьевича «Управление структурообразованием и свойствами вольфрамсодержащих покрытий, полученных газотермическим напылением», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Актуальность темы диссертационной работы

В настоящее время известно, что дальнейшее развитие нефтегазовой отрасли в России, после сложившихся внешнеэкономических отношений требует решения проблем повышения уровня качества ремонта восстановительных узлов и деталей компрессорных станций нефтегазовой отрасли, что невозможно без разработки современных технологий, обеспечивающих улучшение структуры и свойств изделий.

В нефтегазовом машиностроении России газотермические методы нанесения покрытий являются технологически прогрессивными и экономически эффективными в рамках улучшения эксплуатационных характеристик ответственных деталей и узлов оборудования. Современный уровень развития данной области характеризуется, как широким спектром материалов функционального назначения, так и разработкой надежного технологического оборудования и оптимальных параметров его использования. Однако, несмотря на достигнутые результаты, вопросы влияния гранулометрического и химического состава исходных порошков, а также комплексное воздействие параметров напыления на микроструктуру, фазовый состав, физико-механические свойства и напряженное состояние формируемого слоя для различных практических применений остаются недостаточно изученными, что определяет актуальность настоящего исследования. Исходя из этого, актуальность темы диссертационной работы А.Ю. Плесовских, направленная на разработку режимов газотермического напыления и последующей термической обработки опытной порошковой композиции, обеспечивающих восстановительный ремонт ответственных узлов и деталей дожимных компрессорных нефтегазовых станций не вызывает сомнений, а результаты работы обеспечат несомненное развитие машиностроительной отрасли Российской Федерации.

Структура объем и форма изложения диссертации

Диссертация А.Ю. Плесовских, оформлена по общепринятой структуре. Диссертационная работ изложена на 192 страницах машинописного текста, включает 100 рисунков, 26 таблиц. Диссертационная работа состоит из введения, 5

глав, заключения, списка литературы, содержащего 220 наименований, 3 приложения.

Диссертация написана грамотным языком; иллюстрации хорошо дополняют текст. Существенных замечаний по оформлению автореферата и диссертаций нет, оно качественное и выполнено в соответствие с нормативными требованиями, изложение материала – четкое и корректное.

Результаты диссертации опубликованы в 20 научных работах, из них 6 статей в рецензируемых изданиях, входящих в системы индексирования SCOPUS и Web of Science, и рекомендованных ВАК РФ. Имеется патент на изобретение. В публикациях изложены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных автором.

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались на научно-технических семинарах и ряде международных и всероссийских научных конференций (г. Екатеринбург, г. Севастополь, г. Оренбург, г. Тольятти).

Краткое содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность работы, оценена степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи выполненных исследований, представлены научная новизна и практическая значимость работы, приведены методология и методика, объект и предмет исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, подтверждена достоверность результатов работы, указан личный вклад автора в выполненные исследования. Приводятся сведения об апробации работы и публикациях, структуре и объеме диссертации.

В первой главе выполнен аналитический обзор литературных источников по теме диссертационной работы. Рассмотрены особенности эксплуатации ответственных деталей и узлов компрессорного оборудования для нефтегазоперерабатывающей отрасли.

Выявлена основная причина преждевременных отказов деталей компрессорного оборудования, которые изготавливаются из конструкционных сталей. Данной причиной является усталостное разрушение, обусловленное взаимосвязанным действием коррозионных, механических и усталостных факторов в сочетании с дефектами материалов и термической обработки, особенно в условиях воздействия агрессивных сред и циклических нагрузок.

Проанализированы упрочняющие технологии, применяемые к конструкционным сталям, работающим в сероводородсодержащих средах. Сравнительный литературный анализ методов упрочнения показал преимущества газотермического напыления, обеспечивающего формирование покрытий с

высокой адгезионной прочностью, низкой пористостью и минимальным термическим воздействием на подложку.

Рассмотрено влияние химического состава и структурного состояния поверхностного слоя на прочностные характеристики, износостойкость и склонность к трещинообразованию изделий, восстановление и упрочнение рабочей поверхности. По результатам выполненного аналитического обзора сформулированы цель и задачи работы.

Во второй главе установлена марка материала зарубежного изготовителя деталей «Шток» для компрессорного оборудования нефтегазоперерабатывающей отрасли. Проведен комплексный анализ химического состава порошковых смесей для нанесения покрытия газотермическим методом. Выявлен способ нанесения покрытия методом газопламенного напыления. Выполнен комплекс научно-методических подходов к разработке и оптимизации технологии газопламенного напыления упрочняющих покрытий для штоков компрессорного оборудования.

Описаны методики выполненных в работе оптической и электронной металлографии, определения химического и фазового составов, механических свойств и уровня напряжений, испытаний на трение.

В третьей главе представлены результаты исследования строения нанесенного покрытия Ni-Cr-B-Si-WC газотермическим методом. Установлено структурообразование и распределение легирующих элементов в напыленном покрытии по этапам оптимизации. Изучена микроструктура после оптимизации технологических параметров напыления подслоя. В качестве подслоя был использован самофлюсующийся никель-алюминиевый порошок марки Castolin Ultra Bond 5100 92 (Ni-основа, 4% Mo, 5% Al) с микротвердостью 140-190 HV.

На основании проведенных исследований по оптимизации технологических параметров режим: расстояние от сопла до детали 130 мм, скорость линейного перемещения горелки 25 мм/с, скорость вращения заготовки 100 мин⁻¹ выявил существенное снижение общей пористости с 12% до 6,4% и значительное увеличение адгезионной прочности до 24,7 МПа. Основным фактором, обусловившим значительное снижение пористости на данном этапе, стало применение самофлюсующегося никель-алюминиевого подслоя. Дополнительный вклад в снижение пористости внесла оптимизация гранулометрического состава исходной порошковой композиции, что позволило обеспечить эффект заполнения микрополостей более мелкими фракциями, что привело к формированию плотной структуры с минимальной остаточной пористостью.

Проведенные комплексные исследования фазового состава напыленного покрытия системы Ni-Cr-B-Si-WC позволили установить стехиометрический состав карбидных WC, Cr₂₃C₆, Cr₃W₃C упрочняющих фаз в матрице γ-Ni. Анализ картограмм показал равномерное распределение хрома и бора по всему объему

напыленного слоя. Установлено, что при этом частицы WC имеют преимущественно сферическую морфологию.

В четвертой главе проведены исследования, направленные на повышение адгезионной прочности и износостойкости покрытий с помощью проведения различных режимов термической обработки.

Разработан оптимальный режим термической обработки опытной порошковой композиции Ni-Cr-B-Si-WC. Установлено, что за счет закалки с температуры 1150 °C в водополимерную среду «Термат», происходит формирование уплотненной lamельной структуры металлической матрицы с равномерным карбидным упрочнением. Прирост износостойкости после термической обработки обеспечивается за счет упругопластического состояния lamельной структуры, целенаправленного формирования в рабочем слое сложных дисперсных карбидных и боридных фаз: Cr₇C₃, Cr₅B₃ и В₄С, дополнительно выделяющихся на этапе термического упрочнения и армирующих вязкую матрицу γ- твердого раствора на основе Ni.

Выявлено, что в процессе закалки происходит снижение общей микротвёрдости связующей основы не более чем на 20%, снижение твердости не оказывает значительного влияния на износостойкость материала с покрытием.

В пятой главе проведен математический расчет в программном комплексе ANSYS напряженно-деформированного состояния пары сопряжения «шток-поршень» с учетом влияния нагрузок от рабочих газов и температурного вложения на этапе эксплуатации. Установлено, что распределение разности главных механических напряжений на границе «подложка-покрытие» не превышает 20 у.е., что соответствует 9,1 МПа. При экспериментально подтвержденной адгезионной прочности покрытия 39,9 МПа и расчетных напряжениях 34,5 МПа в системе моделирования ANSYS, обеспечена гарантированная работоспособность изделия при эксплуатационных нагрузках.

Установлен значительный экономический эффект от внедрения импортозамещающей технологии производства и упрочнения штоков нефтегазового оборудования, составляющий 0,7 млн. руб. на одно изделие за счет сокращения сроков ремонтных простоев оборудования в 3-4 раза.

В заключении приведены основные результаты и выводы по работе.

В приложениях представлены акты внедрения диссертационной работы в ООО «Технология» г. Оренбург и ГПЗ ООО «Газпром переработка» г. Оренбург, а также патент на изобретение.

Содержание диссертации охватывает основные вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается следующим:

- системность, последовательность, согласованность, логичность и непротиворечивостью изложения результатов;
- обоснованностью актуальностью темы исследования, структуры диссертации, концепции и программы исследования;
- взаимоувязанной методологической платформой и концептуальными решениями;
- соответствием частных и общих выводов, сделанных в работе, основной идейной линии диссертационного исследования.

В целом работа выполнена на хорошем методическом и теоретико-экспериментальном уровне. Анализ содержания позволяет заключить, что все поставленные задачи решены и цель исследования – достигнута.

Оценка степени научной новизны результатов диссертации

В диссертационной работе автором получены следующие наиболее важные новые научные результаты:

1. Научно и экспериментально обоснован новый (подтвержденный патентом) состав композиционного вольфрамсодержащего порошкового покрытия системы Ni-Cr-B-WC (59,0% Ni, 28,9% W, 5,3% Cr, 1,7% Fe, 1,2% B, 2,5% Si, 1,4% C), отличающийся оптимальным содержанием легирующих элементов (W, Cr, B) в никелевой матрице, дисперсностью карбидной фазы в пределах 15–30 мкм, что обеспечивает формирование износостойкого слоя на рабочих поверхностях деталей нефтегазового оборудования.

2. Впервые установлены зависимости между морфологическим составом порошковых композиций и параметрами газотермического напыления вольфрамсодержащего покрытия системы Ni-Cr-B-Si-WC, позволяющие управлять структурой и свойствами формируемой поверхности.

3. Предложен механизм упрочнения, основанный на объемном приросте и межламельном перераспределении в γ -твердом растворе дисперсных фаз $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 , Cr_3W_3C , Cr_5B_3 и B_4C , отличающийся формированием монолитной структуры, обладающей оптимальным упругопластическим состоянием и высокой степенью заполнения межламельных микропустот, обеспечивающей снижение пористости с 2,5 до 1 %, повышение микротвердости и износостойкости поверхности на 35-50%.

Научная новизна исследований вольфрамсодержащего покрытия подтверждена патентом на изобретение.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, рекомендаций, заключений и выводов

Достоверность результатов обеспечена корректной постановкой задач, значительным массивом экспериментальных данных и применением современных металлургических методик. Верификация результатов осуществлялась путем сопоставления с данными ведущих отечественных и зарубежных исследователей в данной области. Практическая значимость работы подтверждена успешной апробацией разработанных решений в реальных производственных условиях.

Для достижения поставленной цели и задач диссертационной работы были использованы:

- металлографические исследования, микрорентгеноспектральный и рентгеноструктурный анализ;
- механические характеристики определялись посредством испытаний на адгезионную прочность, износостойкость и дюрометрические измерения;
- особое внимание уделялось анализу пористости покрытий и контролю остаточных напряжений магнитоанізотропным методом;

В целом, обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертанта подтверждается:

- использованной методологической платформой, основанной на ранее полученных результатах теоретических и экспериментальных исследований в областях разработки методов газотермического напыления и термической обработки;
- корректным применением апробированного в научной практике исследовательского и аналитического аппарата;
- достаточной новизной научных положений, выносимых на защиту, значением их для мировой и отечественной теории и практики металлургии и термической обработки сплавов, развития страны и соответствующей отрасли научных знаний;
- глубоким анализом полученных результатов, доказательностью сделанных выводов и установленных закономерностей, предложенных рекомендаций;
- отсутствием противоречий при сопоставлении результатов исследования с данными зарубежного и отечественного опыта;
- опытом практической реализации результатов исследования в производстве, научных исследованиях, учебном процессе образовательных учреждений;
- положительными экспертными оценками специалистов, обсуждением результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях;

- публикациями основных результатов исследования в рецензируемых научных изданиях, включенных в «Перечень...» ВАК РФ и системы индексирования SCOPUS и Web of Science.

Соответствие представленной работы требованиям, предъявляемым к диссертациям и паспорту специальности

Положения и результаты диссертации Плесовских А.Ю., обладают научной новизной и практической значимостью, при этом полученные результаты соответствуют сформулированным научным положениям. Основные результаты диссертации относятся к области газотермического напыления и термической обработки деталей из конструкционных сталей, используемых при изготовлении компрессорного оборудования нефтегазовой отрасли. Предложенные новые варианты и режимы обработки позволяют успешно осуществлять восстановление изношенных поверхностей деталей «Шток».

Публикации имеют достаточно высокий уровень и полностью отражают содержание диссертации.

Диссертационная работа Плесовских А.Ю. отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тема и содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 2.6.1 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов по пунктам 2,3,6,7.

Практическая значимость и использование результатов

В результате выполнения диссертационной работы разработаны технологические решения, направленные на разработку режимов нанесения газотермического напыления и последующей термической обработки опытной порошковой композиции, обеспечивающих восстановительный ремонт ответственных узлов и деталей дожимных компрессорных нефтегазовых станций.

Разработанные варианты технологии введены в производственное исполнение на предприятие ООО «Технология» г. Оренбурга и на Оренбургском газоперерабатывающем заводе ООО «Газпромпереработка» при промышленной эксплуатации, упрочненного порошковой композицией Ni-Cr-B-Si-WC штока компрессора марки 382K01.

Установлен значительный экономический эффект от внедрения импортозамещающей технологии производства и упрочнения штоков нефтегазового оборудования, составляющий 0,7 млн. руб. на одно изделие за счет сокращения сроков ремонтных простоев оборудования в 3-4 раза.

Результаты работы используются в учебном процессе кафедры производственных технологий обработки материалов ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

Разработанные технологические режимы могут быть использованы на других машиностроительных предприятиях, например, ОАО «ЕПК Самара», осуществляющих ремонт деталей оборудования и изготовление новых типов подшипников, а результаты диссертации в других высших учебных заведениях, например, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», при подготовке бакалавров и магистров.

Замечания по диссертационной работе

1. В первой главе не представлены альтернативные методы нанесения газотермического покрытия для нефтегазовой отрасли.

2. При представлении результатов микротвердости (HV) в первой главе рис. 2.5 и таблица 2.7, в третьей главе п. 3.3 стр.115 и в четвертой главе п. 4.1 стр. 121 не указывается нагрузка. Согласно требованиям нормативных документов и ГОСТ нагрузку принято указывать.

3. Почему в диссертационной работе не рассмотрены отечественные аналоги зарубежной стали AISI 4140? Также не рассмотрена возможность применения отечественных аналогов в нефтегазовой отрасли с применением газотермического напыления вольфрамсодержащего покрытия системы Ni-Cr-B-Si-WC.

4. При представлении графиков микрорентгеноспектрального анализа покрытия системы Ni-Cr-B-Si-WC на рис. 3.12, 3.14, 3.16, 3.18, 4.5 не указаны по вертикальной шкале единица длины.

5. В диссертационной работе в главе пятой п.5.2 представлены данные экономического эффекта. Почему указаны значения только одного метода нанесения покрытий ХГТН? Не совсем понятно по каким критериям была произведена оценка экономического эффекта?

6. Вторая глава диссертационной работы перегружена. Зачем описывать подробно методику проведения испытаний на стр. 58-61 п.2.4 – 2.5 стр.62-69? Достаточно сослаться на нормативные документы. В главе есть рисунки, данные по оборудованию 2.9, 2.11, 2.15, которые дают формальную информацию, не относящуюся к проведению научных исследований.

7. Не совсем понятно почему во второй главе п.2.3. стр. 56, все составы опытных порошковых композиций содержат до 30% по массе упрочняющей карбидной фазы WC?

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

Отмеченные замечания существенно не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают ее научную и практическую ценность.

Диссертационная работа А.Ю. Плесовских является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые научно обоснованные технологические решения и разработки в области термической обработки и газотермического напыления, обеспечивающие качественное восстановление стальных деталей и имеющие существенное значение для развития страны.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и достаточно полно отражает его.

Диссертационная работа А.Ю. Плесовских полностью соответствует требованиям, в том числе п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК Российской Федерации, утвержденного Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатам диссертациям, а ее автор Плесовских Алексей Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Даю согласие на обработку моих персональных данных.

Официальный оппонент
Главный металлург ОАО «ЕПК Самара»,
кандидат технических наук

Якимов Николай Сергеевич

« 19 » 02 2026 г.

Специальность, по которой защищена диссертация: 2.6.17 –
Материаловедение.

Адрес почтовой и электронный: 443068, г. Самара, ул. Мичурина, 98А,
Тел. +7 (927) 744-11-88; E-mail: n.yakimov@epkgroup.ru

Подпись Якимова Николая Сергеевича заверяю, кандидата технических наук заверяю.

Начальник отдела кадров - Гусева Анастасия Сергеевна

