

ОТЗЫВ

официального оппонента **Задорожного Владислава Юрьевича**, доктора технических наук, профессора кафедры физического материаловедения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» на диссертацию **Плесовских Алексея Юрьевича** «Управление структурообразованием и свойствами вольфрамсодержащих покрытий, полученных газотермическим напылением», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

1 Актуальность темы исследования

Газотермические методы нанесения покрытий в нефтегазовом машиностроении являются технологически 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. Но, несмотря на достигнутые результаты, вопросы влияния гранулометрического и химического состава исходных порошков, а также комплексное воздействие параметров нанесения покрытий на микроструктуру, фазовый состав, физико-механические свойства и напряженное состояние формируемого слоя для различных практических применений остаются недостаточно изученными, что определяет актуальность настоящего исследования.

Исследования, представленные в диссертационной работе Плесовских Алексея Юрьевича, связаны с процессом упрочнения рабочей поверхности ответственных деталей нефтегазового оборудования методом газопламенного напыления. Предметом исследования выбран механизм структурообразования и формирования функциональных свойств износостойких вольфрамсодержащих покрытий. Конкретная цель работы состояла в исследовании структурообразования и комплекса механических свойств вольфрамсодержащих покрытий, полученных газотермическим напылением порошковых композиций системы Ni-Cr-B-Si-WC на поверхности ответственных деталей нефтегазового оборудования, а также в отработке оптимальных режимов напыления покрытий и последующих термических обработок, позволяющих управлять процессами газотермического напыления для достижения требуемых характеристик конечного изделия.

В рамках этого в работе проведены: разработка составов напыляемых композиций с оптимальным содержанием и формой карбида вольфрама в металлической матрице; оптимизация параметров газотермического напыления, обеспечивающих требуемое сочетание механических свойств; проведено

выявление закономерностей структурообразования при напылении и термическом упрочнении поверхности; проведена оценка напряжённого состояния и эксплуатационных характеристик детали с вольфрамсодержащим покрытием; апробация технологии упрочнения рабочей поверхности в условиях ремонтного производства.

Результаты, полученные в диссертационной работе, актуальны в условиях сложившейся внешнеполитической обстановки, и могут найти широкое распространение в рамках импортозамещения в производстве большинства ответственных деталей и узлов оборудования, функционирующего на дожимных компрессорных станциях нефтегазовых предприятий России (например, для изготовления штоков компрессоров).

2 Оценка содержания диссертации, ее завершенности и качества оформления. Соответствие публикаций и автореферата основным положениям диссертации

Рукопись диссертации состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных источников и приложений. Текст изложен на 192 страницах, включает 26 таблиц, 100 рисунков. Список использованных источников содержит 220 наименований. В приложениях на 11 страницах приведена дополнительная информация.

Диссертация оформлена по общепринятой структуре.

Во *введении* обоснована актуальность темы диссертации, показана степень её разработанности, сформулированы научная проблема и цель исследования, определены объект и предмет исследования, представлена научная гипотеза, перечислены задачи исследования, сформулирована научная новизна работы, описана теоретическая и практическая значимость работы, представлены методология и методы исследования, определены положения, выносимые на защиту, обоснована степень достоверности, приведены сведения о реализации и апробации результатов исследования.

В *первом разделе* представлен аналитический обзор литературы, посвященной анализу современного состояния технологий восстановления и повышения износостойкости деталей компрессорного оборудования, проведен комплексный анализ литературных источников, соответствующих тематике диссертационной работы. Детально изучены специфические условия эксплуатации, основные причины возникновения дефектов и принципы упрочнения поверхностей ответственных элементов нефтегазоперерабатывающего оборудования. Особое внимание уделено систематизации сведений о композиционных порошковых материалах, обеспечивающих достижение требуемых эксплуатационных характеристик. Рассмотрено влияние различных независимых факторов на прочностные характеристики, износостойкость, адгезионную прочность и пористость при нанесении покрытий методом газотермического напыления. Раздел заканчивается краткими выводами по проанализированной литературе с формулированием основных проблем в изучаемой области.

Во *втором разделе* описаны материалы и методы исследования. Сразу же хотелось бы отметить, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне с использованием самых современных экспериментальных методов исследования (в частности, с применением рентгеноструктурного анализа, высокоразрешающей растровой электронной микроскопии и др.).

В *третьем разделе* содержатся экспериментальные результаты работы по исследованию закономерностей структурообразования в поверхностном слое при напылении, представлены результаты структурных исследований после различных режимов напыления. Проведенные комплексные исследования фазового состава напыленного покрытия системы Ni-Cr-B-Si-WC позволили установить механизмы упрочнения и характер распределения легирующих элементов. В результате установлено образование карбидных фаз и равномерное распределение хрома и бора по всему объёму напыленного слоя по границам ламелей, при этом частицы WC имеют преимущественно сферическую морфологию, а их наличие влияет на увеличение твердости и износостойкости напыленного покрытия.

В *четвёртом разделе* представлены результаты по влиянию режимов термической обработки на структуру и свойства материала с покрытием, продемонстрирована возможность управления фазовым составом и морфологией покрытия термическим воздействием. В результате разработан оптимальный режим термической обработки опытной порошковой композиции Ni-Cr-B-Si-WC. Установлено, что за счет закалки с температуры 1150 °С в водополимерную среду «Термат», происходит формирование уплотненной ламельной структуры металлической матрицы с равномерным карбидным упрочнением. Показано, что прирост износостойкости после термической обработки обеспечивается за счет упругопластического состояния ламельной структуры, целенаправленного формирования в рабочем слое сложных дисперсных карбидных и боридных фаз, дополнительно выделяющихся на этапе термического упрочнения и армирующих вязкую матрицу γ - твёрдого раствора на основе Ni.

В *пятом разделе* проведена оценка напряжённого состояния и эксплуатационных характеристик материала с вольфрамсодержащим покрытием, описан анализ распределения напряжений в готовом изделии «Шток компрессора». Установлено, что распределение разности главных механических напряжений на границе «подложка-покрытие» соответствует 9,1 МПа. При экспериментально подтвержденной адгезионной прочности покрытия 39,9 МПа и расчетных напряжениях 34,5 МПа. Расчеты показали, что экономический эффект от внедрения импортозамещающей технологии производства и упрочнения штоков нефтегазового оборудования, составляет 0,7 млн. руб. на одно изделие за счет сокращения сроков ремонтных простоев оборудования в 3-4 раза.

В одном из приложений представлены справки об успешной апробации результатов работы на предприятиях ООО «Технология» и ООО «Газпром переработка» (г. Оренбург).

Таким образом, содержание диссертации охватывает основные вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается следующими обстоятельствами:

- системностью, последовательностью, согласованностью, логичностью и непротиворечивостью изложения результатов;
- обоснованностью актуальности темы исследования, структуры диссертации, концепции и программы исследования;
- взаимосвязью основной идейной линии, частных и общих выводов.

В целом работа обладает научной новизной и практической значимостью, выполнена на высоком методическом и теоретико-экспериментальном уровне.

Качественное техническое оформление (достаточное количество графиков, рисунков, таблиц), чёткое и корректное изложение материала диссертации с приведением результатов расчётов отражают цель диссертационной работы. Сформулированные научные задачи успешно решены, что позволяет сделать вывод о завершённости работы.

Представленные в диссертации научные положения, выносимые на защиту, на мой взгляд достаточно полно отражены в 10 научных работах автора (статьи в журналах из перечня ВАК, индексируемых в базах SCOPUS и WoS, а также тезисы научных докладов, представленных в рамках различных конференций и семинаров), что свидетельствует о новизне результатов исследования.

Содержание автореферата объёмом не более 1 печатного листа соответствует содержанию диссертации; в автореферате изложены основные идеи и выводы диссертации, показан вклад автора в проведённое исследование, степень новизны и практическая значимость результатов исследований.

Диссертация написана грамотным техническим языком и хорошо оформлена. В диссертации отсутствуют заимствованные материалы без ссылок на авторов и источники заимствования. В тексте диссертации приведены ссылки на совместные работы, выполненные соискателем в соавторстве.

3 Степень обоснованности выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна

Сделанные в работе выводы подтверждены многочисленными и разносторонними исследованиями, дополняющими друг друга. Результаты, приведенные в диссертации достоверны, так как для их получения были использованы современные методы исследования.

Представленные выводы основаны на значительном объеме проведенных исследований и дают возможность корректно оценить экономический эффект от использования полученных автором результатов.

Следует отметить особое изложение результатов и выводов, что повышает информативность работы. В целом по содержанию результаты и выводы отражают решение основных задач исследования. Результаты и выводы являются обобщением теоретических и экспериментальных результатов и представляют несомненную ценность для науки и практики, обладают существенной научной новизной и достоверностью.

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

- выбранной методологической базой из ранее полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований по процессам упрочнения рабочей поверхности ответственных деталей нефтегазового оборудования методом газопламенного напыления, а также механизмам структурообразования и формирования функциональных свойств износостойких вольфрамсодержащих покрытий;

- новизной научных положений, выносимых на защиту, значением их для отечественной теории и практики;

- сопоставлением результатов исследования с данными зарубежного и отечественного опыта;

- опытом практической реализации результатов работы в научных исследованиях;

- подтверждением результатов 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, а также индексируемых в базах SCOPUS и WoS.

Достоверность результатов исследования обеспечена следующими факторами:

- использование современных методик сбора и обработки исходной информации;

- получение экспериментальных данных в результате испытаний с использованием стандартных и апробированных методов исследований и сертифицированного оборудования;

- установление сходимости результатов экспериментальных и теоретических исследований, совпадение с результатами, представленными в независимых источниках по теме диссертационного исследования;

- непосредственное участие соискателя в получении исходных данных и научных экспериментах;

- обоснованный подбор объектов (единиц) наблюдения и измерения.

Таким образом, все научные положения, выводы и рекомендации обоснованы и достоверны.

4 Научная и практическая ценность работы. Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Научная ценность работы заключается в разработке и экспериментальном обосновании нового состава композиционного вольфрамсодержащего порошкового покрытия системы Ni-Cr-B-Si-WC, отличающегося рациональным содержанием легирующих элементов (W, Cr, B) в никелевой матрице; в установлении зависимости между морфологическим составом порошковых композиций и параметрами газотермического напыления вольфрамсодержащего покрытия системы Ni-Cr-B-Si-WC, позволяющего управлять структурой и свойствами формируемой поверхности и в предложении механизма упрочнения покрытия, отличающегося формированием монолитной структуры, обладающего

оптимальным упругопластическим состоянием и высокой степенью заполнения межламельных микропустот и обеспечивающего снижение пористости до 1 %, повышение микротвердости и износостойкости поверхности на 35-50%.

Практическое значение использования полученных научных результатов состоит в разработке и внедрении импортозамещающей технологии поверхностного упрочнения штоков поршневых компрессоров нефтегазового оборудования, гарантирующей регламентированные значения микротвёрдости, износостойкости, адгезионной прочности покрытия при соблюдении шероховатости и геометрической точности изделия в соответствии с отраслевыми стандартами. Так, в работе предложен метод формирования монолитного поверхностного слоя на основе вольфрамсодержащих композиций, включающий холодное газотермическое напыление с последующим оплавлением границ армированной карбидами никелевой металлической основы, последующей высокотемпературной термической обработкой в виде закалки с температуры 1100-1150 °С в водополимерную среду «Термат», формирующей спеченную ламельную структуру с выделением устойчивых дисперсных включений на основе хрома, вольфрама и бора.

Результаты работы могут быть рекомендованы к использованию на машиностроительных и металлургических предприятиях, например, на Оренбургском газоперерабатывающем заводе ООО «Газпромпереработка», ООО «Технология» г. Оренбурга и на других предприятиях, которые производят или используют штоки поршневых компрессоров дожимных компрессорных станций, упрочнённые газотермическим напылением.

Вышеизложенное позволяет утверждать, что рецензируемая работа вносит существенный вклад в теорию и практику по развитию технологий и средств, направленных на повышение работоспособности ответственных деталей и узлов оборудования, функционирующего на дожимных компрессорных станциях нефтегазовых предприятий.

Содержание диссертации соответствует заявляемой области исследований паспорта научной специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

5 Основные замечания по работе

По содержанию и оформлению диссертации можно сделать следующие комментарии и замечания:

1. Из текста диссертации остаётся не ясным, из каких соображений был выбран оптимальный состав покрытия Ni-Cr-B-Si-WC? И будет ли состав 59% Ni; 28,9% W; 5,4% Cr; 1,7% Fe; 1,2% B; 2,4% Si; 1,4% C, определённый спектральным методом, всегда соответствовать такому соотношению компонентов при каждом новом напылении? Есть ли повторяемость получения композиции оптимального состава при каждом новом эксперименте? Почему в заключении (первый вывод) значения по Cr и Si немного отличаются (на десятые доли процента) от тех значений, что получены спектральным анализом? В этой связи, вероятно

соотношение компонентов (при обозначении оптимального состава) следует указывать, используя определённый интервал значений их концентраций, в том числе, и с учётом погрешности измерений?

2. Страница 91 диссертации (пункт 3.2.1. Изучение микроструктуры после оптимизации технологических параметров напыления подслоя), не совсем понятно, почему в качестве подслоя был использован самофлюсующийся никель-алюминиевый порошок марки Castolin Ultra Bond 5100? Какие ещё варианты были исследованы и почему именно этот порошок и режимы его нанесения выбраны, как оптимальные?

3. На страницах 96-100 диссертационной работы отмечается, что при нанесении композиционного покрытия с содержанием 30% в объёме карбида вольфрама, количество усвоенного карбида вольфрама в покрытии в итоге не превышает 5,5% (при использовании частиц 30 мкм) и 1,5%, при использовании частиц 60 мкм. Возникает вопрос, куда исчезает карбид вольфрама в процессе напыления, если учесть, что изначально его содержание было 30%? На странице 100 также отмечено, что оптимальный диапазон карбидных частиц соответствует размерам 15-30 мкм, в этом случае наблюдается кратное увеличение объемной доли упрочняющей фазы WC в сечении покрытия. Но, к сожалению, не указано какая именно доля частиц карбидных частиц остаётся в покрытии в этом случае?

4. Из текста диссертационной работы (страница 140) не совсем понятно почему остаточные механические напряжения покрытого образца меньше, чем у оригинального зарубежного аналога (глава об оценке разности главных механических напряжений)? Каким образом нанесение покрытия и последующая термическая обработка делает напряжение меньше, чем у зарубежного аналога?

5. В автореферате и тексте диссертации встречаются некоторые неточности и опечатки оформительского характера, например:

- На некоторых графиках отсутствует обозначения осей, например, в литературном обзоре нет обозначения оси ординат для рисунков 1.12 и 1.17 (правая часть);

- В автореферате, страница 7, раздел «Структура и объём работы» присутствует некоторая несогласованность падежей. Например, «содержит 100 рисунка, 26 таблицы»;

- На некоторых микрофотографиях нет линейки масштаба и описания рисунков в подрисуночных подписях. Например, на рисунке 3.2 три картинки без конкретного описания каждой из них и без линейки масштаба. Это же касается рисунков 3.5, 3.6, 5.6, 5.10.

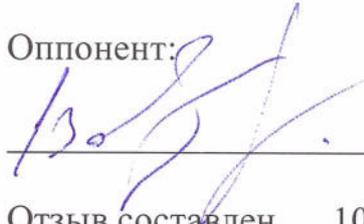
Сделанные замечания не снижают научной значимости и практической ценности работы.

6 Заключение

Диссертация на тему «Управление структурообразованием и свойствами вольфрамсодержащих покрытий, полученных газотермическим напылением» является научно-квалификационной работой, в которой изложены научно - обоснованные технологические решения и разработки для использования газотермических методов нанесения покрытий в нефтегазовом машиностроении

для улучшения эксплуатационных характеристик ответственных деталей и узлов оборудования, имеет существенное значение в области нефтегазового машиностроения и металлургического производства в частности, а также экономики страны в целом, по совокупности разработанных положений, выводов и рекомендаций соответствует требованиям пунктов 9 - 14 «Положения о присуждении ученых степеней», а её автор, Плесовских Алексей Юрьевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Оппонент:



Задорожный Владислав Юрьевич

Отзыв составлен 10 февраля 2026 года

Сведения об авторе отзыва:

Задорожный Владислав Юрьевич - доктор технических наук, профессор кафедры физического материаловедения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»; 119049, Москва, Ленинский проспект, д. 6, строение 7; тел.: +7-495-638-44-13; E-mail: vuz@misis.ru.

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ

Проректор по безопасности
и общим вопросам
НИТУ МИСИС М. Исаев

