

ПОЛУЧЕНО
ОГУ Вх
«02» 03 2026 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУН Институт

металлургии имени академика Н.А.

Ватолина Уральского отделения

Российской академии наук,

академик РАН,

профессор



Ремпель А. А.

11 февраля 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института металлургии имени академика Н.А. Ватолина

Уральского отделения Российской академии наук (ИМЕТ УрО РАН)

на диссертацию **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 исследования

Вопросы обеспечения работы и повышения ресурса ответственного оборудования нефтегазовых производств в условиях импортозависимости являются стратегически важными для экономики страны. Особое значение при этом приобретают технологии восстановления и упрочнения критически важных деталей, таких как штоки поршневых компрессоров дожимных компрессорных станций, которые зачастую изготавливаются по зарубежным технологиям и из импортных материалов. Эксплуатация такого оборудования характеризуется экстремальными нагрузками, воздействием абразивного износа и агрессивных сероводородсодержащих сред. Одним из перспективных методов повышения износостойкости и коррозионной стойкости рабочих поверхностей является холодное газотермическое напыление (ХГТН) защитных покрытий. Применение вольфрамсодержащих композиций позволяет формировать покрытия с высоким комплексом эксплуатационных

свойств. Однако типовые технологии ХГТН имеют ряд недостатков, связанных с формированием пористой ламельной структуры, неравномерным распределением упрочняющих карбидных фаз, наличием остаточных напряжений и недостаточной адгезией к основному металлу. Основная проблема заключается в сложности управления процессом структурообразования покрытия, который определяется комплексом факторов: гранулометрическим и химическим составом исходных порошков, параметрами напыления, режимами последующей термической обработки. Это обуславливает необходимость проведения поэтапных исследований для выявления взаимосвязи между технологическими параметрами, формируемой микроструктурой, фазовым составом и конечными эксплуатационными характеристиками покрытий. Таким образом, разработка научно обоснованной технологии управления структурообразованием и свойствами вольфрамсодержащих покрытий для упрочнения деталей нефтегазового оборудования является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное значение для отечественной промышленности.

Научная новизна

Научная новизна исследований заключается, в том, что в работе предложен комплексный подход к управлению микроструктурой и свойствами вольфрамсодержащих покрытий, формируемых методом ХГТН, который позволяет существенно повысить ресурс деталей компрессорного оборудования. При этом, из выполненных исследований следует выделить следующие основные новые научные результаты:

- 1) научно и экспериментально обоснован новый состав композиционного вольфрамсодержащего порошкового покрытия системы Ni-Cr-B-Si-WC, отличающийся оптимальным содержанием легирующих элементов и дисперсностью карбидной фазы, для упрочнения поверхностей деталей, работающих в условиях интенсивного изнашивания (п.2 паспорта научной специальности 05.16.01);

2) установлены закономерности структурообразования упрочняемого поверхностного слоя в процессе оптимизации параметров ХГТН, демонстрирующие влияние гранулометрии и морфологии частиц карбида вольфрама на плотность упаковки, пористость и распределение упрочняющих фаз в покрытии (п.3 паспорта научной специальности 05.16.01);

3) определено распределение остаточных напряжений, формирующихся в изделии с покрытием системы Ni-Cr-B-Si-WC на этапах послойного нанесения и последующей термической обработки, определяющее напряженно-деформированное состояние упрочненной поверхности (п.3 паспорта научной специальности 05.16.01).

Структура и объем работы.

Диссертация включает введение, пять глав с описанием результатов исследований, заключение, изложена на 192 страницах, содержит 100 рисунка, 26 таблицы и список использованных источников из 220 наименований, 3 приложения.

Во введении приведены: обоснование актуальности темы исследования; цель и задачи исследования; объект и предмет исследования; научная новизна и практическая значимость работы; сведения об апробации и положения, выносимые на защиту. Дан краткий обзор структуры и содержания диссертационной работы.

В Главе 1 *«Анализ 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. Проведенный комплексный аналитический обзор научных публикаций, патентных документов и технической документации позволил сформулировать цель и задачи диссертации.

В Главе 2 *«Разработка составов напыляемых композиций, получение покрытий и методы исследования»* представлены систематизированные сведения о разрабатываемых материалах, используемом лабораторном оборудовании и методических принципах проведения исследования. На основании анализа зарубежных прототипов методом обратного инжиниринга определены ключевые требования к упрочняющим покрытиям компрессорного оборудования, учитывающие как эксплуатационные механические свойства, так и технологические параметры процесса их нанесения.

В Главе 3 *«Исследование закономерностей структурообразования в поверхностном слое при напылении»* представлены результаты структурных исследований после различных режимов напыления.

В Главе 4 *«Анализ влияния режимов термической обработки на структуру и свойства материала с покрытием»* продемонстрирована возможность управления фазовым составом и морфологией покрытия термическим воздействием. Термическая обработка покрытия Ni-Cr-B-Si-WC применялась с целью повышения эксплуатационных характеристик за счет увеличения адгезионной прочности, снижения внутренних напряжений и формирования более плотной lamellarной структуры.

В Главе 5 *«Оценка напряжённого состояния и эксплуатационных характеристик материала с вольфрамсодержащим покрытием»* описан анализ распределения напряжений в готовом изделии «Шток компрессора», проведённый посредством прибора «Stressvision», в основе работы которого лежит метод магнитоанизотропного анализа механических напряжений.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 научных статей, в том числе 2 – в изданиях из «Перечня...» ВАК, 4 – в изданиях, индексируемых в международных базах SCOPUS и Web of Science, 1 патент на изобретение.

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития отрасли наук «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Научная значимость диссертации А.Ю. Плесовских заключается в сформулированных и научно обоснованных требованиях по выбору химического состава и морфологии многокомпонентных порошковых материалов системы Ni-Cr-B-Si-WC, изучении особенностей фазовых и структурных превращений в поверхностном слое при комбинированном газотермическом и термическом упрочнении, установлении механизма упрочнения, основанного на формировании монолитной lamellarной структуры, армированной дисперсными карбидными и боридными фазами.

Полученные научные результаты позволяют оптимизировать параметры ХГТН и последующей термической обработки, обеспечить на базе полученных количественных зависимостей заданный уровень адгезионной прочности, износостойкости и пористости покрытия.

Результаты научных исследований внедрены в производство на предприятии ООО «Технология», г. Оренбург, при упрочнении штоков поршневых компрессоров на объектах ООО «Газпром Добыча Оренбург». Практическая эффективность от внедрения данной технологии заключается в сокращении сроков ремонтного цикла компрессорного оборудования с 270 до 45 рабочих дней для каждого элемента установки, что обеспечивает значительный экономический эффект.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты и выводы диссертационного исследования рекомендуется использовать в следующих направлениях деятельности:

- Результаты определения основных технологических параметров ХГТН

и последующей термической обработки, количественные зависимости, показывающие их влияние на адгезионную прочность, пористость, фазовый состав и распределение карбидных фаз в покрытии – в научно-исследовательских целях – для разработки новых направлений в области создания композиционных материалов для газотермического напыления и совершенствования методов прогнозирования их эксплуатационных характеристик.

- Результаты эффективного воздействия высокотемпературной термической обработки (закалка с 1150 °С) на структурообразование и уплотнение lamельной структуры напыленного слоя, показавшие, что высокотемпературная термическая обработка вызывает оплавление границ lamелей, интенсификацию диффузионных процессов, выделение дисперсных карбидных и боридных фаз, обеспечивающих повышение адгезионной прочности до 42.2 МПа, снижение пористости до 1%, существенное увеличение износостойкости, сокращение сроков ремонтного цикла компрессорного оборудования – в практических целях – для внедрения в технологические процессы упрочнения и восстановления деталей компрессорного оборудования, а также другого высоконагруженного оборудования нефтегазового комплекса, подверженного интенсивному износу и воздействию агрессивных сред.

- Результаты теоретического и экспериментального обоснования химического состава и морфологии многокомпонентных порошковых материалов системы Ni-Cr-B-Si-WC, отличающихся оптимальным соотношением никелевой матрицы, карбида вольфрама и легирующих элементов – для использования разработанных подходов к выбору композиций и режимов ХГТН в разделах образовательных дисциплин, посвященных изучению методов упрочнения поверхностей, порошковой металлургии и материаловедения защитных покрытий.

Имеется ряд вопросов и замечаний:

1. Какие именно характеристики покрытий (механические, трибологические, структурные) и параметры технологического процесса являлись целевыми функциями при оптимизации? Опишите, пожалуйста, последовательность итеративных шагов. Например, при снижении пористости с 3% до 1,5% какие управляемые факторы (состав, режимы напыления, подготовка подложки) подвергались целенаправленному варьированию?
2. Представьте, пожалуйста, спецификацию использованного газотермического оборудования и детализацию основных технологических режимов (скорость подачи порошка, параметры плазмообразующего/топливного газа, расстояние напыления и т.д.).
3. При анализе изменения пористости и плотности проводилось ли сравнение полученных значений не только с предыдущими этапами работ, но и с опубликованными литературными данными для аналогичных систем?
4. Каков предлагаемый механизм, объясняющий достигнутое снижение пористости? Связано ли оно, например, с изменением степени плавления частиц, скоростью их осаждения или фазовыми превращениями?
5. Проводился ли сравнительный анализ разработанной Вами технологии газотермического напыления с аналогами, предлагаемыми ведущими зарубежными производителями покрытий или установок? В чем заключаются основные технологические или экономические преимущества предложенного решения?
6. Ставилась ли в рамках исследования задача полного импортозамещения технологической цепочки, включая оборудование, материал подложки и порошковые композиции, российскими аналогами? Если да, то какие результаты были получены? Если нет, то почему?

Указанные замечания и вопросы не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, ее научной новизны и практической значимости.

Заключение

Диссертационная работа **Плесовских Алексея Юрьевича** является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе теоретических и экспериментальных исследований разработан новый подход к обоснованию составов, параметров нанесения и термической обработки композиционных порошковых покрытий системы Ni-Cr-B-Si-WC, применяемых для упрочнения методом ХГТН высоконагруженных деталей компрессорного оборудования, работающих в условиях интенсивного изнашивания и контакта с коррозионно-агрессивными эксплуатационными средами. Тем самым сделан весомый вклад в область науки о материалах и методов их термообработки. Практическая значимость результатов исследования определяется успешным внедрением разработанной технологии для упрочнения штоков поршневых компрессоров, что позволило обеспечить импортозамещение и значительно сократить ремонтные простои дожимных компрессорных станций.

На основе анализа содержания диссертации, актуальности ее темы, новизны научных положений, теоретической и практической значимости, полноты опубликования основных результатов, установлено, что диссертация соответствует специальности 2.6.1 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Работа отвечает критериям п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, 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.

Отзыв обсужден и одобрен на научном семинаре «Института металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения Российской академии наук» («ИМЕТ УрО РАН») (протокол №1 от 10 февраля 2026 года).

Председатель семинара

Зам. директора по научной работе ИМЕТ УрО РАН,

доктор физико-математических наук



Р.Е. Рыльцев

Отзыв составили:

Руководитель Отдела материаловедения ИМЕТ УрО РАН,

доктор физико-математических наук



Б.Р. Гельчинский

Старший научный сотрудник лаборатории

порошковых и композиционных материалов ИМЕТ УрО РАН,

кандидат технических наук



С.А. Ильиных

Подписи д. ф.- м. н. Р.Е. Рыльцева, д. ф.- м. н. Б.Р. Гельчинского,

к. т. н. С.А. Ильиных удостоверяю.

Ученый секретарь ИМЕТ УрО РАН

кандидат химических наук



П. В. Котенков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения Российской академии наук (ИМЕТ УрО РАН),

620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101,

тел. (343) 267-91-24, 267-91-30, факс: (343) 297-91-86, imet.uran@gmail.com

11.02.2026 г.