



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Балтийский государственный технический
университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)

Санкт-Петербург, 190005, 1-я Красноармейская ул., д. 1
Тел.: (812) 316-2394, Факс: (812) 490-0591
E-mail: komdep@bstu.spb.su. www.voenmeh.ru
ИНН 7809003047

02.02.2023 № 3/34
На № _____ от _____

Утверждаю

Первый проректор Бородавкин
Вячеслав Александрович,
доктор технических наук, профессор



НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № <u>404</u> / <u>17.26.12</u>	№ _____
<u>02.02.2023</u> г.	подп. _____
Осн. <u>Заказ</u> № <u>2</u> л.	Прил. _____ л.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Геращенко Дмитрия Анатольевича «Создание коррозионно-износостойких покрытий методом синтеза интерметаллического слоя из монометаллических порошков в процессе лазерно-термического воздействия для изделий машиностроения» на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

Научно-технический совет БГТУ «ВОЕНМЕХ» на заседании 17 января 2023 года, протокол № 2301-1, заслушала доклад Геращенко Дмитрия Анатольевича «Создание коррозионно-износостойких покрытий методом синтеза интерметаллического слоя из монометаллических порошков в процессе лазерно-термического воздействия для изделий машиностроения». Работа представлена на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

По результатам доклада, ответов на вопросы, обсуждения и выступлений участников НТС установлено следующее.

Актуальность темы и основная идея работы

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью повышения функциональных характеристик конструкционных материалов. Коррозия и износ являются основными факторами разрушения элементов конструкций, которые постоянно усложняются, включают дорогостоящие материалы и работают в жестких условиях эксплуатации. Например, в реакторах на быстрых нейтронах в составе энергоблока используется свинцовый теплоноситель, что приводит к высокой растворимости легирующих элементов стали в жидком свинце и увеличивает скорость коррозии. Генерация электроэнергии происходит при

вращении турбины, под действием пара, это сопровождается вибрациями при которых образуется зазор в бандажном соединении при разрушение бандажных полок титановых лопаток в результате трения. В судостроении широко используются низколегированные конструкционные стали, которые подвержены, прежде всего, воздействию общей коррозии в морской среде.

Для решения указанных проблем требуется создать на поверхности конструкций защитный функциональный слой с высокой адгезионной прочностью. Защиту от жидкометаллической коррозии стали обеспечивает интерметаллидный слой системы Fe-Al, защиту от износа титанового сплава – интерметаллидный слой системы Ni-Ti. Повысить коррозионную стойкость низколегированной конструкционной стали возможно за счет создания пластичного легированного слоя.

Использование традиционных газотермических методов нанесения покрытий требует применение предварительно изготовленных порошков с фиксированным составом, которые имеют высокую стоимость и их изготовление в России локализовано не в полном объеме. Кроме того, газотермические методы не всегда обеспечивают высокую адгезионную прочность и в результате этого на границе с подложкой при отслоении возникают очаги коррозии. Этот недостаток возможно решить за счет создания химической связи на границе, например, при термической или лазерной обработке.

Основная идея работы заключается в создании интерметаллидного (функционального) слоя на поверхности подложки за счет синтеза нового соединения из материала, предварительно нанесенного на поверхность прекурсорного покрытия, на основе монометаллического порошка и материала подложки. Обеспечить формирование прекурсорного покрытия из монометаллических порошков без структурных и химических превращений может только метод холодного газодинамического напыления. Покрытие образуется при соударении частиц порошка с подложкой при высоких скоростях, а температура самих частиц в потоке не превышает 100°C. Таким образом металлические компоненты покрытия полностью соответствуют исходным порошкам.

В работе предложена оригинальная реализация метода создания интерметаллидного слоя, заключающаяся в комплексном подходе, который включает в себя два этапа. На первом этапе формируется прекурсорное покрытие требуемого состава и толщины. Для этого используются только монометаллические порошки, а требуемый шихтовый состав покрытия обеспечивается за счет использования предварительно подготовленных смесей или при применении многодозаторной системы подачи порошков. Использование монометаллических порошков позволяет гибко управлять составом покрытия и не привязываться к порошкам фиксированного состава. На втором этапе производится термическая обработка или лазерная, которая обеспечивает синтез интерметаллида либо из твердой фазы, либо из жидкой фазы. При синтезе из твердой фазы

интерметаллидное покрытие синтезируется за счет диффузии по принципу самоадаптации равновесной фазы непосредственно в процессе эксплуатации при данной температуре. При синтезе из жидкой фазы состав синтезируемого слоя управляется глубиной ванны расплава, которая регулируется режимами лазерной обработки, составом и толщиной прекурсорного покрытия.

Дальнейшим развитием направления создания защитных покрытий является разработка аддитивной технологии получения 3D-материалов с использованием метода холодного газодинамического напыления и последующей термической обработки. Существенной предпосылкой к этому явились результаты исследования профиля единичных треков и их взаимосвязь со скоростью сканирования, шагом между треками и расходом порошка.

Объектом исследования в диссертации являются защитные интерметаллидные композиционные покрытия систем Fe-Al, Ni-Al, Ti-Al, Ti-Ni и объемные аддитивные материалы с управляемым составом и структурой для повышения коррозионной стойкости, износостойкости и упрочнения поверхностей металлических деталей, которые получены из монометаллических порошков. Покрытия получены с использованием холодного газодинамического напыления прекурсорного покрытия и последующей термической или лазерной обработки.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа представлена в объеме 359 страниц и состоит из введения, 7 глав, основных выводов, списка литературы из 290 источников и 4 приложений – актов внедрения результатов работы.

Во введении приведена общая характеристика работы, представлены цель и задачи, основные положения, выносимые на защиту, а также научная новизна работы.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы, в котором описано современное состояние исследований и разработок в области интерметаллидов на основе алюминия и титана и функциональных покрытий для защиты стали и титановых сплавов от коррозии и износа. Рассмотрены области применения интерметаллидов и технологий их нанесения на поверхность металлов. Рассмотрены способы формирования аддитивных материалов. Описана основная идея работы и подходы ее реализации. Обоснован выбор используемых материалов и технологий нанесения покрытий и последующей лазерной и термической обработки.

Во второй главе дано описание исходных материалов, современных методик исследования и оборудования, используемых для решения поставленных задач. В качестве подложек используются основные конструкционные материалы, которые имеют в своей основе железо или титан. В качестве металлических порошков

использованы алюминий, титан, никель, хром, кобальт с размером частиц от 20 мкм до 60 мкм, а в качестве неметаллических армирующих порошков – карбиды бора, вольфрама, кремния и оксиды алюминия и циркония, нитрид титана с размером частиц 0,5 мкм до 50 мкм.

Проведен расчет параметров лазерной обработки для синтеза интерметаллида системы Ni-Ti на подложке из сплава ВТ6. Проведено термодинамическое моделирование взаимодействия металлических компонентов с керамическими компонентами при лазерной и термической обработке. Установлено образования новых высокотвердых соединений.

В третьей главе рассмотрены способы формирования прекурсорного покрытия требуемого шихтового состава (с гетерогенной или многослойной структурой). Определена зависимость толщины покрытия от расхода порошкового материала, скорости сканирования и шага между единичными треками. Определены режимы процесса формирования прекурсорного покрытия методом холодного газодинамического напыления (расход порошка, скорость сканирования, шаг между треками). В качестве исследуемых систем выбраны Al, Al-Al₂O₃, Ni-Al, Ni-Ti. Установлено, что для получения покрытия с гарантированной толщиной, равной трем четвертям высоты трека, необходимо обеспечить шаг между треками, равный ширине трека на полувысоте. Определены параметры нанесения, которые обеспечивают создание равномерного по толщине слоя. Это позволит создавать требуемый шихтовой состав непосредственно в прекурсорном покрытии заданной толщины.

В четвертой главе представлены результаты исследования модифицированной поверхности с интерметаллидным слоем, полученным при термической или лазерной обработке прекурсорного покрытия из монометаллических порошков. Создание защитного слоя на поверхности конструкций или изделий при использовании термической обработки позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики, при этом синтезируются новые более устойчивые соединения. Представлены режимы обеспечивающие синтез защитного слоя на поверхности конструкционной стали системы Al-Fe для защиты от жидкометаллической коррозии и на основе системы Ni-Fe для защиты от морской коррозии. Показана возможность синтеза интерметаллида из твердой фазы (термическая обработка производилась непосредственно в процессе испытания и это позволило зафиксировать в нем равновесную требуемую фазу), и из жидкой фазы (при использовании оптоволоконного и диодного лазера, что позволяет управлять составом интерметаллидного слоя).

В оптоволоконном лазере узко сфокусированное пятно диаметром от 50 мкм до 100 мкм, зона воздействия локальная, что позволяет проводить обработку с минимальным термическим воздействием вследствие высокой локальности пятна. При использовании диодного лазера пятно обработки может иметь практически

любую конфигурацию, так как формируется из множества независимых диодов. Диаметр пятна единичного диода от 850 мкм до 1000 мкм, при одинаковой мощности лазера удельное тепловложение ниже, следовательно, необходимо увеличить продолжительность воздействия. Площадь пятна практически не ограничена, ограничением служит лишь конструктивное выполнение головки.

Использование диодного лазера позволяет значительно повысить производительность обработки благодаря гибкой адаптации площади и конфигурации ванны расплава в зависимости от конкретной задачи. Применение оптоволоконного лазера обеспечивает меньшее тепловое воздействие и позволяет производить обработку меньших площадей и элементов конструкции с тонкими стенками.

В пятой главе представлен подход, позволяющий повысить твердость поверхности титанового сплава свыше 700HV, снизить коэффициент трения и устранить эффект самосваривания. Для этого в интерметаллидную матрицу Ti-Ni вводится упрочняющий высокотвердый компонент – керамика (карбид кремния, карбид вольфрама, карбид бора и др.). При лазерной обработке происходит синтез интерметаллического слоя Ti-Ni, армированного керамическими включениями.

Экспериментально установлены режимы лазерной обработки при синтезе многокомпонентного слоя FeNiCrCoAl на поверхности низколегированной стали и прекурсорного покрытия из смеси четырех монометаллических порошков состава Ni-Cr-Co-Al в равном эквиатомном соотношении. Этим была продемонстрирована возможность управления составом легированного слоя в широких пределах. Состав полученного легированного слоя соответствовал эквиаtomному сплаву FeNiCrCoAl.

Проведены испытания полученных покрытий на стали и титановом сплаве на коррозионную стойкость, абразивный и гидроабразивный износ. Исследованы трибологические характеристики покрытия системы Ti-Ni и Ti-Ni-WC на поверхности титанового сплава. Результаты показали, что интерметаллид системы Ti-Ni увеличивает стойкость к истиранию в 20 раз и исключает эффект схватывания, а введение керамических частиц повышает микротвердость и износостойкость материала в 80 раз.

В шестой главе представлена реализация подхода к формированию объемных материалов, полученных аддитивным способом с применением технологии холодного газодинамического напыления. Для напыления использованы монометаллические порошки смесей Ni-Al, Ni-Ti, Ti-Al и высокотвердые керамические компоненты. Применение термической обработки аддитивных образцов позволяет синтезировать в них новые соединения с интерметаллической матрицей из алюминидов титана и никеля и нитинола. Кроме того при высокой температуре происходит образование новых соединений при превращении керамики. Показано, что добавление в состав порошка Ti+Al порошка V_4C обеспечивает образование TiB_2 и TiC при температуре около 900°C, что меньше

температуры плавления титана и B_4C , при этом образуется новое соединение по следующей реакции $3Ti + B_4C = TiC + 2TiB_2$. Это позволило обеспечить содержание керамики в аддитивном образце более 50%. При этом следов чистых исходных металлических компонентов не наблюдается.

В седьмой главе представлены технические решения, обеспечивающие формирование на поверхности металла интерметаллидного и композиционного слоев. Способ получения интерметаллидного покрытия описан в инструкции УЕИА 25271.00014, разработанной для АО «Силовые машины». Технологический процесс синтеза интерметаллидного слоя на поверхности стали описан в разработанном патенте RU2701612C1. Технология получения интерметаллидного самоадаптирующегося слоя на поверхности стали описана в патенте RU2678045C1.

Полученные автором результаты имеют высокую значимость для развития материаловедения и науки о функциональных материалах и покрытиях. Следует отметить результаты математического моделирования процессов нагрева при лазерном воздействии, а также термодинамического моделирования процессов взаимодействия металлов с тугоплавкими соединениями, что вносит научный вклад в развитие новых технологий.

Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации

Анализ диссертационной работы показал, что основные научные положения и выводы автора теоретически и экспериментально обоснованы. Это подтверждается корректной постановкой задач, глубокой методической проработкой всех этапов экспериментальных исследований, а также применением современных высокоэффективных методов анализа синтезированных материалов.

Достоверность и оценка новизны научных положений, выводов

Достоверность результатов работы подтверждается комплексным подходом к решению поставленных задач, большим объемом выполненных экспериментов, аттестацией методик выполнения измерений, воспроизводимостью полученных результатов, публикацией полученных выводов и положений исследования в рецензируемых журналах, рекомендованных перечнем ВАК (22 статьи).

Полученные результаты носят характер существенной **научной новизны**. К наиболее значимым следует отнести:

1. Теоретические положения и установленные режимы синтеза интерметаллидного слоя на поверхности титанового сплава и стали при лазерной и термической обработке, которые обеспечивают теоретическую основу и экспериментально подтвержденные режимы, позволяющие адаптировать комплексную

- двухэтапную технологию получения интерметаллидных и композиционных покрытий требуемого состава.
2. Результаты исследования профиля единичных треков покрытий, полученных методом холодного газодинамического напыления монометаллических порошков, состава Al, Al-Al₂O₃, Ni-Ti, Ni-Al и установление взаимосвязи толщины покрытия при скорости сканирования в диапазоне 10-50 мм/с и шаге между треками, равном ширине трека на полувысоте, от расхода порошка.
 3. Подтвержденный подход к управлению составом синтезированного слоя при его формировании из жидкой фазы, который заключается в варьировании толщины прекурсорного покрытия и скорости сканирования лазерного луча.
 4. Установленные режимы формирования коррозионно-стойкого пластичного базового слоя системы Ni-Fe на поверхности низколегированной стали с возможностью дополнительного введения легирующих компонентов до 70%. В частности, формирование высокоэнтропийного сплава на поверхности подложки из Стали 20.
 5. Подхода к повышению трибологических свойств титанового сплава за счет синтеза на поверхности интерметаллидной структуры Ni-Ti при лазерной обработке, что обеспечивает повышение износостойкости в 20 раз. Кроме того, показано, что введение в состав прекурсорного никелевого покрытия, нанесенного на титан, дисперсных частиц WC, SiC, B₄C, при лазерной обработке сопровождается их полным или частичным разложением с образованием упрочняющей фазы TiC, что обеспечивает повышение микротвердости в 2 раза и увеличение износостойкости в 80 раз.
 6. Экспериментально установлены условия формирования аддитивного композиционного материала интерметаллид-керамика методом холодного газодинамического напыления с последующей термической обработкой, обеспечивающие содержание керамической составляющей более 50%. Что несомненно является значимым заданием, который должен обеспечить дальнейшее развитие данного направления, так как формирование аддитивным методом деталей с низким удельным весом востребовано в аэрокосмической отрасли.

Оценка практической значимости разработок и рекомендации по дальнейшему применению результатов работы

Разработанные материалы и технологии использованы на предприятиях АО «Силовые машины», ООО «МеталлРесурс», ОАО «СУ №2», ООО «НевИЗ».

Разработана Технологическая инструкция УЕИА 25271.00014 «Нанесение износостойкого покрытия на контактные поверхности бандажных полок лопаток паровых турбин из титанового сплава» и принята к внедрению в технологический процесс изготовления лопаток паровых турбин из титанового сплава в АО «Силовые

машины». В соответствии с указанной инструкцией изготовлена опытная партия лопаток паровой турбины с износостойким покрытием для защиты поверхности бандажной полки и передана в АО «Силовые машины».

Разработана технология нанесения прекурсорного покрытия для изготовления коррозионно-стойких покрытий на поверхности стали из прекурсорного алюминиевого, а также алюминий-цинкового покрытия с последующей термодиффузионной обработкой. Данные покрытия были нанесены на фасонные изделия общей массой 40 тонн, стальные трубы и отводы тепловых сетей общей массой 120 тонн, крупногабаритные секции стальных ограждений длиной 2,8 м общей массой 20 тонн (акт внедрения от ООО «МеталлРесурс»).

Получено износостойкое керамическое покрытие для элементов гидромотора прототипной модели перспективного трактора отечественного производства (акт внедрения от ООО «НевИЗ»).

Была использована предложенная технология формирования объемного материала для восстановления больших объемов утраченного материала. При ремонте аддитивным способом восстановлено пять комплектов деталей выпускного коллектора дизельного двигателя 6Д 155 трубоукладчика «Комацу» D355 (акт внедрения от ОАО «СУ №2»).

Практические результаты позволили оперативно организовать на базе собственного опытного производства участок по созданию износостойких покрытий системы Ni-Ti-WC с применением финишной лазерной обработки.

Работа может быть рекомендована для дальнейшего использования в различных отраслях народного хозяйства, в том числе в ракетостроении, военной технике, в силовых установках, энергомашиностроении, аэрокосмической и морской технике.

Замечания, относящиеся к диссертационной работе

1. Недостаточно данных по механическим испытаниям покрытий.
2. В работе представлены результаты испытаний на общую коррозию покрытий на стали системы Fe-Al и Fe-Ni, однако об испытаниях более эффективных составов информации нет.
3. Недостаточно описан аддитивный способ и оборудование для получения объемных материалов с применением технологии холодного газодинамического напыления. Как обеспечивается адгезия толстых слоев? Производится ли спекание наносимых слоев?

Следует отметить, что сделанные замечания не меняют общего положительного впечатления о диссертационной работе и не снижают ценности полученных диссертантом результатов и выводов.

Заключение

Диссертационная работа Геращенко Дмитрия Анатольевича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научно-техническом уровне. В работе изложены новые научно-обоснованные технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития технологии получения коррозионно-стойких и износостойких покрытий на конструкциях из стали и титановых сплавов.

По своей актуальности, практической значимости, научной новизне, степени обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций диссертационная работа соответствует критериям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изм. от 26.05.2020. ред. от 11.09.2021), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а её автор, Геращенко Дмитрий Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17 – «Материаловедение (технические науки).

Диссертационная работа Геращенко Д.А. была рассмотрена и получила положительную оценку на заседании Научно-технического совета БГТУ «ВОЕНМЕХ» (протокол № 2301-1 от 17.01.2023.)

Председатель заседания

Профессор кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника» факультета ракетно-космической техники

Начальник Отделения фундаментальных и поисковых исследований.

Начальник научно-исследовательской лаборатории «Беспилотные авиационные и космические транспортные системы»,

Научный руководитель научно-исследовательской лаборатории «Ударно-волновые и взрывные процессы» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

Доцент, доктор технических наук

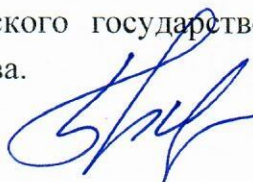


Чернышов Михаил Викторович

Ученый секретарь НТС

Доцент кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника» факультета ракетно-космической техники Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

кандидат технических наук



Брыков Никита Александрович

Одновременно
03.01.2023
