

НИИ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 459/17-26/18	в ДЕЛО
«02» 03 2013 г.	№ _____
Осн. 7 л.	
Прим. _____	

ОТЗЫВ

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

Актуальность выбранной темы

Диссертационная работа Д.А. Геращенко направлена на решение актуальной проблемы повышения функциональных свойств поверхности конструкционных материалов за счет термической и лазерной обработки.

Наиболее распространенными способами получения интерметаллидных покрытий являются газотермические и плазменные методы, которые обеспечивают перенос порошковых материалов или проволок на подложку в среде защитного газа. К недостаткам данных методов можно отнести повышенный расход дорогостоящих порошков интерметаллидов и недостаточная прочность сцепления покрытия с подложкой. Обеспечить высокую адгезионную прочность на уровне химических связей возможно при использовании, например, лазерной наплавки. При воздействии узконаправленного луча формируется ванна расплава, в которую подается порошковый материал. При этом к порошковому материалу предъявляются высокие требования по сферичности и узкому фракционному составу, что значительно повышает его стоимость. Для создания защитных покрытий различных составов необходимо иметь в распоряжении широкий спектр порошков. В этой связи рассмотренный в диссертационной работе Геращенко Д.А. подход к формированию интерметаллидных покрытий с использованием двухстадийной технологии, включающей стадию холодного газодинамического напыления прекурсорного покрытия из порошковой смеси элементов и стадию термической или лазерной обработки, позволит синтезировать на поверхности стали интерметаллидный слой системы Al-Fe, а на поверхности титанового сплава интерметаллидный слой - Ni-Ti. Это обеспечит более высокую адгезионную прочность на уровне химических связей, а применение монометаллических порошков значительно снижает стоимость и позволяет гибко управлять составом покрытий.

Предложенная технология формирования износостойкого интерметаллидного покрытия Ni-Ti, армированного высокотвердыми керамическими компонентами, позволяет решать проблемы в тех областях, в которых конструкции из титановых сплавов работают в условиях трения. Подход к синтезу самоадаптирующегося покрытия Al-Fe на стали позволит с небольшими затратами создать защиту элементов ГЦН от коррозионного воздействия жидкометаллического свинцового теплоносителя. Способ нанесения пластичного слоя (на основе базовой системы Fe-Ni) на поверхности стальных конструкций позволит повысить коррозионную стойкость в морской воде за счет введения в порошковую смесь легирующих добавок.

Таким образом, тема диссертационного исследования по формированию аддитивного материала с интерметаллидной матрицей, армированной керамическими включениями, методом холодного газодинамического напыления и последующей термической обработкой является актуальной.

Степень обоснованности научных положений и выводов

Диссертационная работа Д.А. Геращенко представляет собой цельное и законченное исследование. Автор убедительно продемонстрировал возможность получения интерметаллидных покрытий на поверхности стали и титана с использованием доступных металлических порошков для защиты элементов конструкций от износа и коррозии. Проведенный анализ научно-технической и справочной литературы позволил систематизировать информацию и выбрать в качестве разрабатываемой технологии синтеза интерметаллида комплексную двухстадийную технологию, включающую формирование прекурсорного покрытия и финишную термическую или лазерную обработку. Обоснованно выбраны для проведения лазерной обработки два типа источников лазерного излучения – оптоволоконный и диодный. Оптоволоконный может быть использован для обработки локальных участков и тонкостенных конструкций, а диодный – для обработки больших поверхностей с высокой производительностью. Кроме того, конструктивная особенность диодного лазера позволяет управлять конфигурацией пятна и мощностью в нем. Выполнены работы по исследованию структуры и состава покрытий, а также проведены сравнительные испытания на коррозионную стойкость и износостойкость.

Автор установил взаимосвязь между скоростью сканирования и шагом между единичными треками от расхода порошкового материала в методе холодного газодинамического напыления, что обеспечивает возможность формирования прекурсорного покрытия заданной толщины, а также продемонстрировал возможность управления составом и толщиной синтезированного слоя за счет варьирования толщины и химического состава прекурсорного покрытия и режимов лазерной обработки. Научные положения и заключение хорошо обоснованы, логично вытекают из материала диссертационной работы.

Достоверность результатов и выводов

При выполнении диссертационной работы автор проводил анализ и сравнение полученных результатов. Полученные данные по моделированию термодинамических процессов и расчету тепловых полей, оценке физико-механических свойств и испытаний, результаты микрорентгеноспектрального анализа представлены в виде 70 таблиц и описаны кривыми на рисунках (250 рисунков). Экспериментальные результаты, полученные в процессе подготовки диссертации, а также сделанные автором заключения не противоречат современным научным представлениям.

Научная новизна диссертационной работы Д.А. Геращенко сформулирована следующими основными положениями:

1. Теоретические положения и режимы получения интерметаллидного слоя с высокой адгезионной прочностью и управляемым составом, который образуется при лазерном воздействии на поверхность с предварительно нанесенным прекурсорным покрытием из смеси металлических порошков.

2. Оптимальные режимы формирования методом холодного газодинамического напыления прекурсорного покрытия из монометаллических порошков Al, Ni, Ti и их смесей, в том числе и Al+Al₂O₃, с гарантированной толщиной в три четверти высоты трека, при скорости сканирования в диапазоне от 10 мм/с до 50 мм/с и шаге между треками, равном ширине трека на полувысоте.

3. Синтез на поверхности стали сплошного коррозионностойкого интерметаллидного слоя системы Fe-Al для защиты от воздействия жидкометаллического свинцового теплоносителя необходимо осуществить за счет термической обработки поверхности с предварительно сформированным монометаллическим покрытием алюминия непосредственно при температуре эксплуатации жидкого свинца.

4. Подход к управлению составом синтезированного слоя, который заключается в варьировании толщины прекурсорного покрытия и скорости сканирования лазерного луча. Установлены составы и определены структуры, которые формируются при лазерном воздействии в системе Al-Fe в зависимости от режимов обработки и толщины прекурсорного покрытия. Показано, что для получения интерметаллидного слоя без трещин и пор содержание алюминия должно быть около 12%, а с повышением содержания алюминия появляются трещины и поры.

5. Принципы управления составом базового слоя Fe-Ni путем введения в прекурсорное никелевое покрытие таких элементов как Cr, Co, Al, заключающиеся в варьировании толщины прекурсорного покрытия и глубины ванны расплава. Это позволяет создать на поверхности низколегированной конструкционной стали пластичный слой Fe-Ni с высокой адгезионной прочностью, а повышение коррозионной стойкости до требуемого уровня обеспечивается введением дополнительных легирующих компонентов в виде монометаллических порошков в составе прекурсорного никелевого покрытия.

6. Впервые экспериментально показано, что повышение твердости до 2 раз интерметаллидного слоя системы Ni-Ti на поверхности титанового сплава, обеспечивается в результате полного или частичного растворения дисперсных частиц карбидов WC, SiC, B₄C в расплаве титана при лазерной обработке с образованием упрочняющей фазы TiC. При растворении карбидов в расплаве происходит повышение дисперсности упрочняющей фазы TiC, а ее распределение в объеме материала оказывается более равномерным.

7. Лазерная обработка поверхности титана с прекурсорным никелевым покрытием обеспечивает синтез интерметаллида системы Ni-Ti, что сопровождается повышением износостойкости в 20 раз, а при введении армирующего компонента WC – в 80 раз. Это значительно расширяет возможность использования титановых сплавов в тех узлах, в которых протекают процессы трения.

8. Условия формирования аддитивного композиционного материала с интерметаллидной матрицей и армирующим керамическим компонентом (алюминид или никелид титана/карбид и борид титана) с использованием метода холодного газодинамического напыления, который позволяет использовать монометаллические порошки с низкой температурой плавления и керамические порошки совместно при построении несложной геометрии, и последующей термической обработкой, которая обеспечивает синтез интерметаллида с содержанием керамической составляющей более 50 % и низким удельным весом.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Полученные данные по термодинамическому моделированию показали хорошую сходимость результатов с физическим экспериментом, что позволяет при работе с новыми материалами и составами значительно сократить время на эксперимент.

Результаты исследования режимов, обеспечивающих создание покрытия заданной толщины методом холодного газодинамического напыления из монометаллических порошков, позволили создать технологию нанесения прекурсорного покрытия на основе алюминия на крупногабаритные конструкции. Последующая технологическая операция по термодиффузионной обработке обеспечивает синтез интерметаллида и повышает адгезионную прочность, что обеспечивает повышение коррозионной стойкости стали. С применением данных результатов были нанесены покрытия 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»).

Установленные подходы синтеза износостойкого интерметаллидного покрытия системы Ni-Ti на поверхности титановых сплавов, полученного из смеси порошков никеля и керамических компонентов, обеспечили возможность управления твердостью поверхности в пределах от 600HV до 1200HV и повышение трибологических характеристик. Факт использования простых исходных порошковых материалов обеспечивает снижение затрат на создание покрытий и обеспечивает возможность гибкого управления составом. Положительные результаты исследовательской работы позволили изготовить опытную партию лопаток паровых турбин из титанового сплава ВТ6 с износостойким покрытием на бандажных полках. Создание покрытия производилось в соответствии с разработанной Технологической инструкцией. Разработанная технология принята к внедрению в технологический процесс изготовления лопаток паровых турбин из титанового сплава (акт внедрения от АО «Силловые машины»).

Продемонстрирован потенциал применения метода холодного газодинамического напыления монопорошков с последующей термической обработкой для создания аддитивных композиционных материалов с интерметаллидной матрицей и керамическими частицами, что подтверждено

результатами структурных исследований. Применение данного подхода было реализовано при ремонте и восстановлении аддитивным способом пяти комплектов деталей выпускного коллектора дизельного двигателя 6Д 155 трубуокладчика «Комацу» D355, по состоянию на 12.09.2022 наработка двигателя с восстановленными коллекторами составляет от 790 до 2350 моточасов (акт внедрения от ОАО «СУ №2»).

Исходя из результатов работы и обоснования полученных данных, представлены рекомендации о целесообразности применения подходов синтеза интерметаллидного покрытия на поверхности стали и титановых сплавов для создания надежной защиты от износа и коррозии.

Диссертация выполнена в соответствии с планом основных научных работ НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» по договору с АО «Силовые машины» 2016–2019 гг., гранту РФФИ 20-21-00024 Росатом «Принципы получения заданного структурно-фазового состава интерметаллидных и функционально-градиентных покрытий комбинированием методов гетерофазного переноса и лазерно-термического воздействия для повышения эксплуатационных характеристик оборудования АЭС» 2020–2023 гг. и гранту РФФИ 21-73-30019 «Новые физические и химические принципы технологии металлических, металлокерамических и керамических материалов с управляемой макро-, микро- и наноструктурой и уникальными служебными характеристиками» 2021–2025 гг. Исследования ведутся в рамках проекта научно-образовательного центра мирового уровня «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования» 2021–2024 г.

Разработана технологическая инструкция УЕИА 25271.00014 «Нанесение износостойкого покрытия на контактные поверхности бандажных полок лопаток паровых турбин из титанового сплава» и передана для реализации в АО «Силовые машины».

Разработанная технология защищена патентами РФ: RU 2701612 С1. Способ получения покрытий с интерметаллидной структурой; RU 2678045 С1. Способ получения керамоматричного покрытия на стали, работающего в высокотемпературных агрессивных средах.

В работе использовались современные методы исследования структуры и свойств покрытий и аддитивного материала: дифракционное рассеяние света от частиц для определения гранулометрического состава (лазерный анализатор Malvern Zetasizer Nano-ZS+Malvern Mastersizer 2000); рентгенофлуоресцентная спектрометрия (NITON XL3t 900), рентгеноструктурный фазовый анализ (Rigaku UltimaIV), рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) (Inca X-Max) для проведения химического и фазового анализа; оптическая и просвечивающая электронная микроскопия (Leica DM-2500 оптический микроскоп и Tescan VEGA 3 растровый электронный микроскоп) для проведения металлографических исследований; измерение механических свойств методом инструментального индентирования в соответствии с ISO 14577-1:2015 (Nanoscan 3D) и определение размеров отпечатка в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 для определения микротвердости (ПМТ-3);

оценка стойкости к сухому трению по стандарту ASTM G65 «Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus» и определение коэффициента трения и интенсивности изнашивания в соответствии с рекомендациями P50546288 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод ускоренной оценки износостойкости материалов трущихся поверхностей» для определения трибологических характеристик; электрохимические исследования, определение коррозионных характеристик и последующие расчёты проводили в соответствии со стандартами ASTM G3, G5, G59, G102, ISO 17475:2005 и ГОСТ 9.912-89.

Оценка содержания диссертации, завершённости, подтверждение публикаций автора

Диссертация Д.А. Геращенко написана грамотным научным языком. Обращает на себя внимание большое количество таблиц и рисунков, которые достаточно информативны. Диссертационная работа производит хорошее впечатление, автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Таким образом рассматриваемая диссертация является цельным и завершённым научным исследованием на актуальную тему, обладает научной новизной и подтвержденной практической значимостью. Результаты диссертации достоверны, а заключение и рекомендации научно обоснованы.

По теме диссертации опубликовано 22 научных работ, из них 14 статей в журналах, рекомендованных перечнем ВАК, 8 статей в журналах, входящих в базу данных SCOPUS, получено 2 патента РФ.

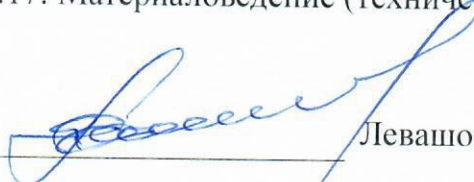
По содержанию работы имеются следующие замечания и вопросы:

1. Автор не привел достаточно доводов для обоснования применения подхода, основанного на использовании предварительного прекурсорного покрытия.
2. Отсутствуют примеры получения на поверхности стали покрытий из известных коррозионностойких сталей для проведения сравнительных испытаний.
3. Не представлены результаты механических испытаний аддитивных композиционных материалов и сведения о способах управления профилем распределения мощности в пятне при использовании диодного лазера.
4. Не дано объяснение влияния свободного вольфрама, который образуется при разложении WC, и как можно избежать его образование.
5. Некоторые рисунки представлены в англоязычном варианте (рис. 1.14, 1.15, 2.49, 4.34 и т.д.), не приводятся доверительные интервалы на кривых измерения профилей трзков и ряде других зависимостей. Имеется небрежность в представлении данных, например, рис. 5.2, 5.15, табл. 4.13, 4.28, 5.8.
6. Отсутствуют данные о величине пористости покрытий в зависимости от состава и технологических параметров на стадиях ХГДН, термической и лазерной обработки.

7. Считаю излишним демонстрацию в главе 2 большого количества равновесных фазовых диаграмм без их детального анализа. Вполне можно было бы ограничиться основными выводами и рекомендациями.

8. Результаты работ безусловно имеют большой научный потенциал. Было бы важно опубликовать их в высокорейтинговых профильных журналах таких как Surface and Coatings Technologies, Wear, Tribology International, Journal of Thermal Spray Technology, др.

Однако, несмотря на указанные замечания, диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (с изменениями в редакции от 20.03.2021, Постановление Правительства РФ №426), предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Геращенко Дмитрий Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).


Левашов Евгений Александрович
«15» 02 2023 г.

Доктор технических наук, специальность 01.04.17 – «химическая физика, в том числе физика горения и взрыва», профессор по специальности 05.16.06 – порошковая металлургия и композиционные материалы, заведующий кафедрой порошковой металлургии и функциональных покрытий, директор Научно-учебного центра СВС МИСиС-ИСМАН Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ МИСИС).

119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр. 1

Телефон: +7- 495-638-45-00

Факс: +7- 499-236-52-98

E-mail: levashov@shs.misis.ru

ПОДПИСЬ  ЗАВЕРЯЮ
Проректор по безопасности
и общим вопросам
НИТУ «МИСиС»  И.М. Исаев




03.03.23