

НИИ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей»	
ДОУ	Вх. № 760/17-26/12 в ДЕЛО
	«03» 03 2023 г.
	Осн. 8 л.
	Прил. л.
№ _____	
подп. _____	

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Леонтьева Леопольда Игоревича

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»,**

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по
специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

Создание коррозионно-износостойких покрытий широко используется в технике, однако во многих случаях при нанесении их плазменными или газотермическими методами, они могут отслаиваться при определенных нагрузках.

Диссертационная работа Д.А. Геращенко посвящена созданию научных основ и технических решений комплексной технологии получения износо и коррозионно-стойких интерметаллидных композиционных покрытий на базе систем Fe-Al, Ni-Al, Ti-Al, Ti-Ni и получаемых объемных аддитивных материалов с управляемым составом и структурой путем использования холодного газодинамического напыления прекурсорного покрытия с последующей термической и лазерной обработкой, что в результате обеспечивало когезионную связь покрытия с основой.

К положительным сторонам такого подхода необходимо также отнести применение достаточно дешевых и доступных материалов, которые производятся в России возможность гибкого регулирования составом защитных покрытий при отсутствии необходимости иметь в наличии широкий набор порошков различных сплавов.

Структура и основное содержание работы

Основной текст диссертационной работы Геращенко Д.А. изложен в объеме 359 страниц и состоит из введения, 7 глав, основных выводов, списка литературы из 290 источников и 4 приложений.

Во введении описана общая характеристика работы, актуальность, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, обозначена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы в области разработок интерметаллидов и способов нанесения покрытий, рассмотрены их

недостатки. Автором обоснованно предложен подход к созданию интерметаллидных и композиционных покрытий. При этом описана сама идея, которая включает в себя двухэтапную комплексную технологию – создание прекурсорного покрытия и его последующую лазерную или термическую обработку. Обоснован метод холодного газодинамического напыления для нанесения прекурсорного покрытия, также его применение для формирования аддитивных материалов.

Во второй главе представлены основные исходные материалы, оборудование и методики. Проведены расчеты термического воздействия при лазерной обработке, которые позволяют оценить распределение температуры в образце и оценить необходимые режимы лазера. Результаты термодинамического моделирования взаимодействия компонентов матрицы с материалом упрочняющего компонента позволяют оценить возможные реакции взаимодействия между ними при создании композиционных покрытий аддитивных материалов.

В третьей главе приведены результаты исследования профиля единичных треков при холодном газодинамическом напылении прекурсорного покрытия из порошков на основе алюминия и никеля. Количественно, полученные результаты можно представить следующим образом: для получения прекурсорного покрытия с гарантированной толщиной, равной трем четвертям высоты трека, необходимо обеспечить шаг между треками, равный ширине трека на полувысоте.

В четвертой главе содержатся результаты исследования синтезированных слоев и технологические режимы их получения, как из твердой, так и из жидкой фазы.

Показано, что синтез интерметаллида Al-Fe для защиты от воздействия свинцовой коррозии происходит за счет диффузии монометаллического слоя алюминия, полученного методом холодного газодинамического напыления на поверхность стали, непосредственно в процессе воздействия на него жидкого свинца при температуре 450°C. Установлены также температурные интервалы образования интерметаллидных фаз при термообработке покрытий системы Ni-Ti и Ni-Al, которые показывают возможность применения метода холодного газодинамического напыления монометаллических порошков для их дальнейшей термической обработки непосредственно в процессе эксплуатации при заданной температуре, а необходимая фаза будет синтезироваться по принципу самоадаптации.

На примере прекурсорного покрытия из алюминия на поверхности стали показано, что для получения интерметаллидного слоя глубина проплавления не должна превышать диаметр ванны расплава. В противном случае

синтезированный интерметаллидный слой содержит многочисленные поры. Это позволяет обосновано использовать для лазерной обработки диодный лазер. В этом случае диаметр ванны расплава значительно превышает ее глубину.

Для синтеза интерметаллидного слоя AlFe на поверхности стали также была применена лазерная обработка как с применением оптоволоконного лазера, так и диодного лазера. Показано, что при увеличении содержания алюминия в интерметаллидном слое 12% и выше начинают прослеживаться трещины, а при превышении 25% образуются поры. Поэтому целесообразнее использовать подход синтеза интерметаллида из твердой фазы.

Для защиты стали от коррозии в морских условиях предложено создание на поверхности пластичного защитного слоя системы Fe-Ni , для этого на поверхность стали наносится прекурсорное покрытие из монометаллического порошка никеля и обрабатывается лазером. Несмотря на то, что сама система Fe-Ni обладает недостаточно высокими коррозионно-стойкими свойствами в морских условиях, она является базой с достаточно высокими пластичными свойствами. Введение в базовый слой дополнительных легирующих компонентов, в виде монометаллических порошков, позволяет управлять свойствами слоя.

Для защиты поверхности титановых сплавов от износа на поверхности синтезируется интерметаллидный слой системы Ni-Ti , который обладает высокой упругостью и высокими триботехническими свойствами. Для его синтеза используется лазерная обработка предварительно нанесенного слоя из монометаллического порошка никеля.

Общим заключением по главе является установление зависимостей и разработка технологических режимов лазерной и термической обработки, которые позволяют создавать интерметаллидное покрытие на поверхности стали и титановых сплавов заданного состава и толщины.

В пятой главе показаны подходы к созданию на поверхности титановых сплавов композиционных покрытий с интерметаллидной матрицей и керамическими компонентами, что позволяет достичь требований по структуре и микротвердости.

Показаны особенности состава и структуры композиционного слоя в зависимости от выбора керамического компонента. Определено, что в зависимости от того, вступает или не вступает керамический компонент в реакцию с материалом матрицы при высокой температуре, его распределение будет отличаться и будет отличаться микротвердость. При использовании упрочняющего компонента, не образующего новые соединения, его дисперсность в составе интерметаллидного слоя сохраняется, но образуются агломераты. Твердость такого композиционного слоя увеличивается. При использовании компонента, образующего новые соединения при разложении,

агломераты отсутствуют, дисперсия выше и микротвердость, соответственно, выше.

Сравнение результатов лазерной обработки с оплавлением и без оплавления подложки прекурсорного покрытия с гетерогенной и многослойной структурой показали, что использование многослойного покрытия позволяет более точно обеспечить требуемый шихтовый состав покрытия, применение прекурсорного покрытия с гетерофазной структурой является более технологичным при условии неоплавления подложки.

Возможность гибкого управления химическим составом легированного слоя позволяет синтезировать на поверхности низколегированной стали слой, состав которого соответствует высокоэнтропийному сплаву состава Fe-Ni-Cr-Co-Al. Для этого в состав ранее исследованного базового слоя Fe-Ni, были дополнительно введены монометаллические порошки Cr, Al, Co.

Результаты сравнительных испытаний покрытий на коррозию и износ показали, что введение в синтезированный базовый слой Fe-Ni повышает коррозионную стойкость низколегированной стали, а синтез интерметаллида системы Ni-Ti на поверхности титанового сплава ВТ6 значительно увеличивает износостойкость при абразивном, гидроабразивном и контактном трении.

В шестой главе описан подход формирования аддитивных материалов методом холодного газодинамического напыления монометаллических и керамических порошков с последующей термической обработкой, что обеспечивает создание композиционного материала с интерметаллидной матрицей. Представлены результаты исследования состава, структуры и твердости, которые подтверждают целесообразность данного подхода для получения аддитивных материалов на основе интерметаллидной матрицы с низким удельным весом.

Седьмая глава описывает технологические режимы и последовательность операций, которые позволяют создать защитные покрытия на основе системы Fe-Al для защиты от жидкометаллической свинцовой коррозии на поверхности стали и на основе системы Ni-Ti на поверхности титанового сплава ВТ6 для повышения износостойкости поверхности бандажных полок лопаток паровой турбины.

В качестве наиболее важных научных результатов работы, определяющих ее **новизну**, следует отметить следующие:

1. Непосредственно выбранный подход, совмещающий две технологические операции – создание прекурсорного покрытия заданной толщины и состава и последующую термическую или лазерную обработку,

которые позволяют применять в качестве исходных материалов монометаллические и керамические порошки.

2. Установленные взаимосвязи между скоростью сканирования, расходом порошка и шагом между треками, которые обеспечивают нанесение покрытия заданной толщины для состава Al, Al-Al₂O₃, Ni-Ti, Ni-Al на основе монометаллических порошков. Данные зависимости будут играть важную роль при нанесении покрытия на большие площади из-за сложности контроля.

3. Экспериментально подтвержденные подходы к синтезу интерметаллидного покрытия из монометаллических порошков при взаимной диффузии по принципу самоадаптации, которые реализуются при температуре эксплуатации. В частности, данный подход позволяет синтезировать на поверхности стали интерметаллидный слой AlFe толщиной более 400 мкм без трещин, который был образован в процессе воздействия жидкого свинца в течение 3000 ч при температуре 450°C.

4. Механизм управления составом и толщиной интерметаллидного слоя, который заключается в управлении составом и толщиной прекурсорного покрытия и режимами лазерной обработки. При создании коррозионно-стойкого слоя для защиты от морской коррозии разработаны принципы управления составом базового слоя Fe-Ni за счет введения в прекурсорное никелевое покрытие Cr, Co, Al с созданием на поверхности низколегированного стального слоя, соответствующего по составу высокоэнтропийному сплаву.

5. Введение в состав прекурсорного никелевого покрытия, нанесенного на титан, дисперсных частиц WC, SiC, B₄C. При лазерной обработке протекают реакции с разложением исходных керамических частиц и образованием новых керамических соединений карбида и борида титана. Положительное влияние упрочнения подтверждено экспериментально и установлено, что твердость увеличивается в 2 раза, износостойкость повышается в 80 раз.

6. Условия формирования аддитивного композиционного материала методом холодного газодинамического напыления монометаллических и керамических порошков с последующей термической обработкой обеспечивают содержание керамической компоненты более 50% в интерметаллидной матрице на основе алюминида или никелида титана. Положительные результаты по созданию аддитивным способом материалов с низким удельным весом, показанные в работе, являются значимым заделом для дальнейшего развития направления по созданию объемных элементов из цветных сплавов и керамики.

Теоретическая и практическая значимость работы, выполненной Геращенко Д.А. не вызывает сомнений. Значимость научной стороны направления диссертации подтверждается выполняемыми работами по грантам

РФФИ и РНФ, а практическая сторона подтверждается востребованностью производственными предприятиями.

Разработанные технологические режимы создания покрытий были применены на предприятиях АО «Силовые машины», ООО «МеталлРесурс», ОАО «СУ №2», ООО «НевИЗ» при изготовлении опытной партии лопаток паровых турбин; при создании коррозионно-стойкого покрытия из прекурсорного слоя на основе алюминия; при формировании прекурсорного алюминиевого слоя с последующим синтезом на нем износостойкого керамического покрытия для элементов гидромотора; при ремонте аддитивным способом элементов ДВС.

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

При выполнении диссертационной работы была 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», а сами технологические принципы защищены патентами РФ: RU2701612C1. Способ получения покрытий с интерметаллидной структурой; RU2678045C1. Способ получения керамоматричного покрытия на стали, работающего в высокотемпературных агрессивных средах.

Достоверность результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается большим объемом выполненных экспериментов, применением для исследований аттестованного аналитического оборудования, воспроизводимостью полученных результатов, корреляцией результатов с результатами других исследователей. Эффективность предложенных технических решений подтверждается успешной эксплуатацией образцов готовых изделий с износостойкими покрытиями на поверхности бандажных полок титановых лопаток паровых турбин и коррозионно-стойких покрытий.

Методичный подход включающий обоснование применения монометаллических порошков, исследование технологических режимов нанесения прекурсорного покрытия методом холодного газодинамического напыления, исследования режимов термической и лазерной обработки на оптоволоконном и диодном лазере, свидетельствуют о высокой степени обоснованности полученных результатов и основных положений.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания**:

1. Профиль трека при нанесении прекурсорного покрытия не является параболой. Почему выбрана квадратичная функция для его описания?

2. В работе представлены результаты формирования интерметаллидного слоя системы AlFe из твердой и жидкой фазы, но не обозначено для каких элементов реактора рекомендуется применять тот или другой способ.

3. В работе установлен эффект расплавления корунда, который содержался в порошковом материале, и последующего распределения на поверхности в виде капель или протяженных линий при воздействии лазером. Возможно ли применить такой подход для создания двухслойного защитного слоя, где нижний слой будет являться интерметаллидом, а верхний состоять из корунда?

4. В главе 4 при обсуждении формирования интерметаллидного слоя системы Al-Fe из жидкой формы при высоком содержании Al наблюдаются трещины и даже полости в интерметаллидном слое. Автор связывает это с хрупкостью интерметаллиза Fe-Al. Но логичнее это объяснить образованием ряда фаз с различными объемными размерами в связи с ограниченной растворимостью Al в Fe.

Указанные замечания не снижают ценность представленной работы.

Оценка содержания диссертации и завершенности работы.

Диссертация Д.А. Геращенко выполнена на современном научно-техническом уровне и является завершенным научным исследованием, характеризующим новые возможности и достижения при создании защитных покрытий с применением современного оборудования. Результаты работы имеют важное значение для отечественного материаловедения в направлении функциональных покрытий для использования в судостроении и атомной энергетике. Диссертационная работа производит хорошее впечатление, автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Основные результаты представлены опубликованными статьями в профильных журналах. По теме диссертации опубликовано 22 научных работы, из них – 14 статей в журналах, рекомендованных перечнем ВАК, 8 публикаций издано на английском языке и индексируются в БД SCOPUS (Author ID 57192719220), получено 2 патента РФ.

По актуальности решаемых проблем, обоснованности научных подходов, объему проведенных исследований, достигнутым результатам и прикладной значимости диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного

Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в редакции Постановления Правительства РФ от 20.03.2021 №426, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Геращенко Дмитрий Анатольевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Доктор технических наук,
профессор, академик РАН,
советник Российской
Академии наук

Леонтьев Леопольд Игоревич

«28» февраля 2023 г.

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК,
119991, г. Москва,
Ленинский пр. 14
тел: (495)938-02-00
E-mail: leo@presidium.ras.ru

Подпись Леонтьева Л.И. заверяю:



Ознакомлен 03.03.23