

Утверждаю
Главный инженер –
Первый заместитель генерального директора
АО «Корпорация «Московский институт теплотехники»



В.Д. Полунин/

19.06. 2018 г.

О Т З Ы В

ведущей организации

на диссертационную работу Михеева Романа Сергеевича на тему:
«Перспективные покрытия с повышенными триботехническими свойствами
из композиционных материалов на основе цветных металлов»,
представленную к защите по специальности 05.16.06 – «Порошковая
металлургии и композиционные материалы» на соискание ученой степени
доктора технических наук

Актуальность темы исследования.

Перспективные покрытия с повышенными триботехническими свойствами из композиционных материалов (КМ) на основе цветных сплавов для опорных узлов машин и механизмов, работающих в различных отраслях промышленности, представляют значительный научный и практический интерес. Это связано с тем, что количество преждевременных отказов машин и механизмов по причине износа в результате трения скольжения достигает крайне высоких значений, например: до 50% в турбостроении; около 70% в насосостроении; до 80% в транспортных средствах и т.д. Причем в узлах трения работают преимущественно поверхностные слои, повреждение которых вследствие износа и приводит к возникновению аварийных ситуаций. Поэтому обеспечение безотказного функционирования трибосопряжений за счет применения композиционных материалов позволит повысить их работоспособность и долговечность. Во многих случаях процесс

изготовления из КМ массивных деталей с макрооднородной структурой оказывается технологически сложным и не оправданным экономически. Следовательно, создание функционально-градиентных слоистых композиций с повышенными триботехническими свойствами на базе конструкционных сталей и сплавов с поверхностными рабочими слоями из КМ на основе цветных металлов является актуальной задачей. Применение подобных материалов значительно сократит затраты на изготовление, а также предоставит возможность осуществления восстановительных ремонтов в процессе эксплуатации изделий триботехнического назначения. Кроме того, решение данной задачи напрямую связано с обеспечением достижения целей, предусмотренных Национальной технологической инициативой. Поэтому не вызывает сомнений актуальность темы диссертационной работы Р.С. Михеева, посвященной разработке научных основ технологий формирования новых функционально-градиентных слоистых композиций и покрытий из КМ на основе алюминия, олова и их сплавов, обладающих повышенными триботехническими свойствами.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы из 347 наименования, изложена на 442 страницах машинописного текста, содержит 206 рисунков, 66 таблиц.

Во введении обоснована актуальность выбранного направления исследования, сформулирована цель, приведена общая характеристика работы с указанием новизны и практической значимости ее результатов.

В первой главе диссертантом рассмотрены современные КМ триботехнического назначения на основе цветных сплавов. Показаны перспективы применения функционально-градиентных слоистых композиций и покрытий из КМ на основе алюминия, олова и их сплавов, обладающих повышенными триботехническими свойствами. Проанализированы технологические подходы к формированию структуры и

свойств покрытий из КМ. По результатам анализа сформулированы цель, задачи и направления исследования. Проведенный литературный обзор подтверждает высокий уровень квалификации и эрудированности диссертанта в области современного композиционного материаловедения, умения критически анализировать и систематизировать сведения и данные, связанные с исследуемой проблемой.

Во второй главе содержатся сведения о материалах, применяемых для изготовления КМ и покрытий из них. Подробно описаны теоретические методы моделирования процесса дуговой наплавки и экспериментальные методики исследования структуры и свойств (механических, триботехнических) КМ и покрытий из них.

В третьей главе приведены результаты исследований по разработке составов и изготовлению новых КМ для триботехнических покрытий с матрицами на основе алюминиевых сплавов и оловянных баббитов различных систем, содержащих наполнители и модифицирующие добавки разной природы, морфологии и размера. Обоснован выбор составов и разработаны технологии, а также изготовлено оборудование и оснастка для получения стандартных наплавочных материалов в виде: прутков из КМ на основе алюминия и олова и композиционных гранул из КМ на основе олова, обладающих необходимыми технологическими свойствами для реализации процессов дуговой наплавки, выполняемой в автоматическом или ручном режиме, что особенно ценно при проведении восстановительных ремонтных операций, а также плазменно-порошковой наплавки, выполняемой в автоматическом режиме. Сформулированные автором положения и выводы являются значительным вкладом в решение вопросов, связанных с производством нового класса наплавочных композиционных материалов триботехнического назначения.

В четвертой главе представлены результаты разработки технологических процессов нанесения покрытий из композиционных материалов. Определены схемы и технологические параметры режимов

дуговой и плазменно-порошковой наплавки, обеспечивающие получение покрытий, характеризующихся отсутствием пористости, качественной адгезией с подложкой, и обладающих композиционной структурой с заданной долей армирования, удовлетворительным распределением наполнителя и механическими свойствами не уступающими изотропным КМ близкого состава. Раскрыты закономерности образования и роста интерметаллидов при изготовлении процессом дуговой наплавки функционально-градиентных слоистых сталеалюминиевых композиций с рабочими покрытиями из КМ на основе алюминия. Разработана и верифицирована математическая модель процесса дуговой наплавки, учитывающая теплофизические свойства промежуточного алюминиевого, а также расположенного в диффузионной зоне интерметаллидного слоя системы Fe-Al, и позволяющая с погрешностью до 8% определять температуру нагрева в любой точке образца при нанесении на сталь с частичным проплавлением промежуточного слоя покрытий из алюмоматричных КМ.

Проведено моделирование процесса взаимодействия атомов, входящих в состав оловосодержащего матричного сплава, с атомами углерода графеноподобной поверхности в присутствии атомов кислорода, попадающих в расплав вместе с углеродными нанотрубками (УНТ), при температуре плавления баббитовых сплавов (664 К). Теоретически и экспериментально показано, что за счет образования интерфейсного слоя УНТ могут выполнять роль центров кристаллизации как для матричного сплава на основе олова, так и для медьсодержащей интерметаллидной фазы системы Sn-Cu.

В пятой главе изучены триботехнические свойства покрытий из КМ. Показано, что композиционные покрытия, изготовленные процессами дуговой и плазменно-порошковой наплавки, характеризующимися высокими скоростями охлаждения, с применением разработанных наплавочных материалов, вследствие возрастания дисперсности структуры и роста

прочности матрицы, обладают триботехническими характеристиками не уступающими объемно-армированным КМ близкого состава и превосходящими широко применяемые антифрикционные сплавы на основе алюминия (АО20-1) или олова (Б83). Определено, что присутствие в составе разработанных и сформированных покрытий из КМ на основе сплавов алюминия и олова тугоплавких наполнителей микронного и субмикронного размера, в том числе углеродных структур, позволяет за счет влияния на размеры образующихся интерметаллидных фаз и дисперсность элементов литой структуры покрытий, а также на межфазное взаимодействие по поверхностям раздела между модифицирующими добавками, армирующими и интерметаллидными частицами, и матричным расплавом обеспечить нормальное протекание в установившемся режиме процессов трения и износа в широком диапазоне параметров трибонагружения (напряженность работы: $p \cdot V = (0,08-3,3) \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$), т.е. решить важную задачу увеличения ресурса работы покрытий, особенно при повышенных трибонагрузках.

Шестая глава посвящена изучению вариантов модифицирующей обработки поверхности полуфабрикатов разработанных КМ. Диссертантом предложены и апробированы методы модифицирующей обработки с применением высококонцентрированных источников энергии (электрической дуги, горячей в магнитном поле, и луча лазера), которые благодаря своей универсальности и экономичности могут быть легко встроены в существующие на предприятиях технологические циклы производства изделий триботехнического назначения. Определены составы КМ, предупреждающие интенсивное межфазное взаимодействие между наполнителем и матрицей, а также установлены технологические параметры модифицирующей обработки, обеспечивающие вследствие значительного (на порядок) диспергирования структуры матричного сплава снижение интенсивности и коэффициентов изнашивания обработанных деталей в 1,5-2 раза.

В заключении представлены основные результаты и выводы по диссертационной работе. В приложении приведены документы (протоколы, акты и справки), подтверждающие опробование и практическое внедрение результатов работы.

Значимость работы для науки заключается в развитии нового научного направления - создание функционально-градиентных слоистых композиций с повышенными триботехническими свойствами на базе конструкционных сталей и сплавов с поверхностными рабочими слоями из КМ на основе цветных металлов.

1. Впервые предложены и реализованы методы синтеза новых функционально-градиентных слоистых композиций процессами дуговой и плазменно-порошковой наплавки, а также модифицирующей обработкой поверхности изотропных материалов высококонцентрированными источниками энергии. Показано, что технологические свойства (литейные свойства, свариваемость, деформируемость и др.) разработанных новых КМ на основе алюминия, олова и их сплавов систем Al-Si-Mg, Al-Si-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mg, Al-Sn-Cu, Sn-Sb-Cu, содержащих в качестве наполнителей микронные частицы карбида кремния (SiC), карбида титана (TiC), оксида алюминия (Al_2O_3), интерметаллидов системы Al_xTi_y , серебристого графита (C), а также субмикронные частицы бора (B), карбида бора (B_4C), углеродные нанотрубки и порошки модифицированной шунгитовой породы, позволяют изготавливать из них наплавочные материалы и получать покрытия на подложках из низкоуглеродистой стали или сплавов алюминия.

2. Выявлены закономерности поведения новых функционально-градиентных слоистых композиций с покрытиями из КМ в условиях трения и износа. Показана возможность обеспечения нормального протекания в установившемся режиме процессов трения и износа в широком диапазоне параметров трибонагружения за счет влияния на размеры образующихся интерметаллидных фаз и дисперсность элементов литой структуры

покрытий, а также за счет влияния на межфазное взаимодействие по поверхностям раздела между модифицирующими добавками, армирующими и интерметаллидными частицами, и матричным расплавом.

3. Определены закономерности образования и роста интерметаллидов при контакте матричного расплава с материалом подложки или интерметаллидами системы Al-Fe при нанесении композиционных покрытий на стальные основания. Для процесса дуговой наплавки с полным проплавлением предварительно нанесенного на поверхность стали промежуточного алюминиевого слоя предложен механизм образования интерметаллидного слоя отличительной особенностью которого является контакт алюмокремниевого расплава не с поверхностью стали, а с имеющимся на границе раздела интерметаллидным слоем системы Fe-Al. Показано, что при сплошном интерметаллидном слое по всей его поверхности происходит рост с меньшей скоростью новых интерметаллидов системы Fe-Al-Si, в то время как дискретный интерметаллидный слой разрушается и не оказывает влияние на кинетику их образования.

4. Установлена возможность для разработанных материалов почти на порядок повысить дисперсность матриц без деградации армирующих частиц за счет модифицирующей обработки электрическим дуговым разрядом в магнитном поле или лучом лазера. Результатом модифицирующей обработки является повышение твердости и износостойкости поверхностных слоев на 20-40% и в 1,5-2 раза, соответственно.

5. Раскрыто влияние термического воздействия процесса дуговой наплавки покрытий при синтезе функционально-градиентных слоистых композиций на характеристики интерметаллидного слоя по границе раздела сталь-алюминий. В частности, впервые теоретически и экспериментально определена критическая температура нагрева (803 К) дискретного интерметаллидного слоя, превышение которой приводит к снижению уровня адгезионной прочности композиций из-за образования и роста в твердой фазе интерметаллидов в свободных от «оплавов» зонах на границе раздела.

Показано, что прочностные характеристики таких композиций определяются не только значением толщины интерметаллидного слоя, но и его характером. Установлено, что адгезионная прочность наплавленного на сталь алюмокремниевого покрытия при дискретном слое в два раза выше по сравнению со сплошным слоем интерметаллидов. Данная закономерность сохраняется и в случае превышения значений средней толщины дискретного слоя по сравнению со сплошным слоем интерметаллидов.

Значимость работы для производства состоит в том, что по результатам теоретических и экспериментальных исследований:

- Разработаны новые составы и технологии, а также изготовлено оборудование для получения наплавочных материалов в виде прутков и гранул из КМ на основе алюминия и олова, позволяющих формировать функционально-градиентные слоистые композиции с повышенными триботехническими характеристиками (увеличение износостойкости до 10 раз, снижение коэффициента трения на 60% по сравнению с традиционными антифрикционными сплавами АО20-1 и Б83) процессами дуговой и плазменно-порошковой наплавки (патенты №2361710 от 12.02.2008 г., №2585588 от 11.12.2014 г.).

- Установлена и обоснована взаимосвязь для разработанных наплавочных КМ и покрытий из них между составом матричного сплава, долей, размером и типом наполнителя, и их технологическими свойствами. В частности, для достижения требуемого качества формирования покрытий из КМ на основе алюминия несимметричность поперечного сечении наплавленных на наклонную плоскость валиков должна превышать 1,65. Количество наполнителя минимального размера (14 мкм) в наплавочных материалах не должно превышать 10 масс.%, а содержание кремния в матричном алюминиевом сплаве должно составлять (11-13) масс.%. Установлено, что для обеспечения сплошности изготовленных методом экструзии наплавочных материалов из КМ на основе олова доля наполнителя

в них не должна превышать 5 масс.%. Показано, что субмикронные частицы меди, образующиеся в результате функционализации на поверхности углеродных нанотрубок, являются дополнительными активными очагами взаимодействия и схватывания при изготовлении композиционных гранул.

- Определены новые схемы и технологические параметры режимов дуговой и плазменно-порошковой наплавки, обеспечивающие получение покрытий, обладающих композиционной структурой с заданной долей армирования и распределением наполнителя.

- Впервые предложена и верифицирована математическая модель процесса дуговой наплавки, учитывающая теплофизические свойства промежуточного алюминиевого, а также диффузионного слоя, состоящего из интерметаллидов системы Fe-Al, и позволяющая с погрешностью до 8% определять температуру нагрева в любой точке образца при наплавке на сталь алюмоматричных КМ с частичным проплавлением промежуточного слоя. Разработан расчетный метод определения минимального значения толщины промежуточного алюминиевого слоя, обеспечивающего отсутствие падения прочности функционально-градиентных сталеалюминиевых композиций.

- Определены новые схемы и технологические режимы модифицирующей обработки КМ высококонцентрированными источниками энергии - дуговым разрядом в магнитном поле и лучом лазера, позволяющие повысить дисперсность матрицы в поверхностном слое в 5-10 раз, увеличить твердость на 20-40%, износостойкость в 1,5-2 раза.

Значительная практическая ценность результатов диссертационной работы подтверждается их опробованием и внедрением на предприятиях ООО НПФ «УралМеталлГрафит», ООО «Аттестационный центр городского хозяйства», ООО «НПП КУРС», ООО «НефтеГазМонтаж», ООО «ПК. Борец» «Центр разработки нефтедобывающего оборудования» и ООО ТДВ «Евразия» для изготовления и ремонта изделий из КМ новых составов. В

частности, экономическая эффективность от внедрения разработанных КМ системы Al-TiC составила 238 400 рублей.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечена:

- корректностью постановки цели и задач диссертационного исследования;
- применением комплекса современных теоретических, расчетных и экспериментальных методов исследования;
- интерпретацией результатов, базирующейся на известных представлениях о смачивании и структуре поверхностей раздела, межфазном взаимодействии, структурно-фазовом составе и свойствах КМ, механизмах трения и изнашивания;
- качественным и количественным согласованием результатов теоретических и расчетных исследований с проведенными экспериментальными исследованиями автора;
- успешной реализацией разработанных методик и технологий при производстве и опробовании деталей из функционально-градиентных слоистых композиций в промышленных условиях.

Замечания по работе

Наряду с достоинствами работы, отмеченными выше, можно высказать некоторые замечания:

1. Установленные автором механизмы образования интерметаллидного слоя при разработке технологии нанесения на сталь покрытий из КМ на основе алюминия характеризуются интенсивным протеканием диффузионных процессов. Однако, автор не использовал процессы массопереноса железа и кремния в алюминиевой матрице для прогнозирования влияния технологических параметров процесса наплавки на образование интерметаллидов с использованием имеющихся в литературных источниках значений коэффициентов диффузии.

2. Не исследовано модифицирующее влияние обработки поверхности высококонцентрированными источниками энергии композиции Al-TiC, хотя указывается, что это наиболее перспективный материал.

3. Мало изучено влияние напряженного состояния в переходном слое на адгезионную прочность формируемых триботехнических композиционных покрытий.

4. В диссертационной работе говорится об учете теплофизических свойств интерметаллидного слоя при моделировании тепловых процессов наплавки, но остается непонятным, учитывался ли дискретный характер интерметаллидного слоя.

Сделанные замечания носят рекомендательный характер, могут быть учтены автором в дальнейших исследованиях и не меняют общего положительного впечатления о диссертационной работе.

Общее заключение.

Диссертация Михеева Романа Сергеевича «Перспективные покрытия с повышенными триботехническими свойствами из композиционных материалов на основе цветных металлов» является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании полученных автором результатов исследований изложены научно обоснованные технические решения по созданию новых функционально-градиентных слоистых композиций и покрытий из КМ на основе алюминия, олова и их сплавов, обладающих повышенными триботехническими свойствами, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие экономики страны. Считаю, что представленная диссертационная работа отвечает критериям, установленным п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Михеев Роман Сергеевич достоин присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.06 - «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Доклад по диссертационной работе заслушан, а отзыв обсужден и одобрен на заседании научно-технического совета Отделения специальных технологий (отделения 4) АО «Корпорация «Московский институт теплотехники» (протокол №8 от 2018 г.).

Заместитель генерального конструктора –

Главный технолог



С.В. Чельшев

Ученый секретарь НТС



Н.И. Лепилина