МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

ул. Молодогвардейская, 244,
гл. корпус, г. Самара, 443100
Тел.: (846) 278-43-11, факс (846) 278-44-00
E-mail: rector@samgtu.ru
ОКПО02068396,ОГРН1026301167683,
ИНН 6315800040, КПП 631601001

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор -
проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»,
доктор технических наук, профессор

_____ М. В. Ненашев

«18» сентября 2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о научно-практической ценности диссертации
Муканова Самата Куандыковича
на тему: «Реакционная электроискровая обработка для поверхностного упрочнения и выглаживания аддитивных поверхностей никелевых и титановых изделий»
на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.06. Порошковая металлургия и композиционные материалы

Актуальность темы

Стремительно развивающейся отраслью машиностроения в настоящее время являются аддитивные технологии (АТ), которые позволяют в полностью автоматизированном режиме получать сложнопрофильные изделия высокого качества. Топографическая неоднородность поверхности аддитивных деталей, включающая в себя в том числе открытую пористость, микротрещины и агломераты непроплавленных частиц, является следствием многих факторов при послойном формировании и негативно влияет на усталостные и фрикционные свойства. Изделия, получаемые аддитивными технологиями, широко используются в авиапромышленности, машиностроении, энергетическом комплексе, медицине и характеризуются сложной формой, поэтому традиционная механическая обработка, например фрезерование или точение поверхностей для улучшения её качества, не представляется

возможной. Актуальной проблемой является разработка различных способов финишной обработки поверхностей аддитивных деталей, позволяющих улучшить ее качество. Многообещающим методом устранения перечисленных выше поверхностных дефектов является электроискровая обработка (ЭИО), которая за счет быстрого локального нагрева и охлаждения и протекающего процесса реакционного фазообразования может позволить сформировать на поверхности готовых деталей защитные слои с повышенными триботехническими свойствами.

Диссертационная работа Муканова С.К. на тему «Реакционная электроискровая обработка для поверхностного упрочнения и выглаживания аддитивных поверхностей никелевых и титановых изделий» направлена на разработку функциональных износостойких и жаростойких слоев, формируемых методом ЭИО на поверхности заготовок из сплавов на никелевой и титановой основе, полученных по технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) и селективного электронно-лучевого сплавления (СЭЛС). Тематика работы отражает мировые тенденции в области разработки эффективных способов поверхностного упрочнения и выглаживания аддитивных поверхностей.

Для решения сформулированной выше проблемы в работе предложено использование легкоплавких электродов, обладающих высокой жидкотекучестью и реакционной способностью в процессе ЭИО, с целью залечивания дефектов и образования износостойких фаз на поверхности аддитивных изделий. Актуальность выбранной соискателем темы не вызывает сомнений и подтверждается ее выполнением в соответствии с тематическими планами проектов Российского фонда фундаментальных исследований № 19–33–90286 и № 19–58–18022, а также государственного задания № 0718–2020–0034 Минобрнауки России в сфере науки по созданию лаборатории «In situ диагностики структурных превращений». Предложенные Мукановым С.К. новые научные положения строго аргументированы, теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены. Полученные научные результаты могут быть использованы для решения многих научных и прикладных задач.

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа Муканова С.К. состоит из введения, литературного обзора, методики экспериментов, изложения и обсуждения результатов, общих выводов, списка использованных источников и 5 приложений. Диссертационная работа изложена на 118 страницах машинописного текста, содержит 27 таблиц, 62 рисунка, 16 формул. Список использованной литературы содержит 148 источников.

Во введении приводится обоснование актуальности выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, сформулирована научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первом разделе представлен аналитический обзор литературы, подтверждающий актуальность выбранной темы диссертации. Рассмотрены основные способы улучшения качества поверхностей изделий, полученных аддитивными технологиями: механическая (пескоструйная, дробеструйная, шлифовальная, полировальная), ультразвуковая, электрохимическая, лазерная обработка и осаждение покрытий. Показано, что наиболее универсальным и экономичным способом устранения поверхностных дефектов является метод ЭИО. Проведен анализ влияния частотно-энергетических режимов электроискровой обработки на структуру и качество поверхности модифицированного слоя. Показана возможность получения упрочняющих интерметаллидных фаз в модифицированном слое при разумном подборе пар «электрод-подложка». Отмечено, что увеличение доли жидко-капельной фазы в процессе ЭИО способствует формированию интерметаллидов в модифицированной поверхности.

По результатам анализа литературы, рассмотренной в разделе, в качестве объекта исследования автором обоснованно выбраны околоэвтектические составы сплавов на основе Al трех систем Al-Si, Al-Ca-Si и Al-Ca-Mn, которые использованы в качестве электродов для электроискровой обработки АТ-изделий.

Во втором разделе описаны используемые в работе исходные материалы, подробно описан метод закалки расплава для получения легкоплавких околоэвтектических электродов, а также методики исследования свойств получаемых электродов: жидкотекучести, удельного сопротивления и термического анализа. Представлена методика и режимы электроискровой обработки аддитивных поверхностей образцов из сплавов на основе никеля и титана.

Описаны методы изучения условий формирования новых фаз в процессе электроискровой обработки, включающие в себя оптическую, растровую электронную микроскопию и рентгеноструктурный фазовый анализ, а также методы исследований топографии поверхности, механических и трибологических свойств с опорой на межгосударственный и международные стандарты. Кроме того, подробно описана методика исследования жаростойкости образцов с модифицированными поверхностями, адаптированная под конкретные объекты исследования.

В **третьем разделе** представлены результаты по разработке одностадийного способа получения структурно-однородных легкоплавких стержневых ЭИО-электродов с узким интервалом плавления (15-20 °С) и мелкозернистой структурой. Приведены сравнительные исследования микроструктуры и термического поведения промышленного сплава АК9 и полученных электродов. Показано, что данный метод позволяет получать электроды с гомогенной структурой и относительно низкой температурой плавления. Рассмотрены кинетические закономерности массопереноса в процессе ЭИО, показывающие влияние частотно-энергетических параметров, состава электродов и типа рабочего инструмента

(вибрационного/ротационного) на скорость формирования модифицированного слоя. По результатам исследования кинетики массопереноса автору удалось установить оптимальную длительность электроискровой обработки объектов, полученных СЛС и СЭЛС.

Четвертый раздел посвящен оптимизации параметров процесса ЭИО для максимально эффективного устранения дефектов и поверхностного упрочнения СЛС и СЭЛС образцов из сплавов на основе никеля (CompoNiAl-M5-3, ЭП741НП) и титана (ВТ6). По результатам комплексного исследования структуры и свойств модифицированных слоев автором установлены режимы ЭИО, при которых образуются интерметаллидные фазы. Показана возможность устранения поверхностных дефектов и понижения шероховатости поверхности за счет образования расплава под воздействием искровых импульсов. Изучены трибологические и механические свойства образцов с модифицированными поверхностями. Показано влияние режимов обработки на определяемые свойства. Обнаружено, что ЭИО титанового образца ВТ6 электродом Al-9%Si на оптимальном режиме приводит к появлению интерметаллидных фаз TixAly, уменьшению размера кристаллитов до 34 нм и повышению износостойкости в 13 раз.

В **пятом разделе** представлены результаты исследования возможности применения ЭИО для защиты СЛС изделий из никелевых сплавов от окисления при повышенных температурах. СЛС образцы ЭП741НП были обработаны с применением электродов Al-12%Si, Al-7%Ca-1%Mn, Al-6%Ca-0,6%Si по установленному ранее оптимальному режиму электроискровой обработки и подвергнуты высокотемпературному окислительному отжигу при температурах 870 °С и 1000°С в течение 10 часов и 30 часов, соответственно. Было проведено исследование фазового состава, распределения механических свойств и химических элементов в модифицированных поверхностных слоях, шероховатости поверхности, трибологических свойств и стойкости к высокотемпературному окислению с построением и регрессионным анализом кинетических кривых окисления. Выявлено, что электроискровая обработка СЛС образца ЭП741НП электродом Al-7%Ca-1%Mn способствует повышению износостойкости и жаростойкости за счет формирования интерметаллидов NiAl, Ni_3Al, а при 1000 °С двойного слоя $CaMoO_4/Al_2O_3$. Показано, что содержание кальция в составе электрода Al-6%Ca-0,6%Si не достаточно для формирования при данной температуре сплошного слоя из тетрагональных зерен $CaMoO_4$, что выражается в более высокой скорости окисления.

Диссертационная работа завершается выводами, обобщающими полученные соискателем научные и практические результаты.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) Установлено, что при электроискровой обработке СЛС никелевого сплава ЭП741НП и СЭЛС титанового сплава ВТ6 легкоплавкими околоэвтектическими электродами Al-Si проходит оплавление выступов и образуется химически активный жидкотекучий расплав,

который заполняет поры и взаимодействует с химическими элементами основы, образуя износостойкие и жаростойкие алюминиды при взаимодействии с никелем (NiAl, Ni_3Al) и титаном (TiAl, $TiAl_3$, Ti_5Al_{11}, Ti_3Al_5);

2) Электроискровая обработка околоэвтектическим электродом 92%Al-7%Ca-1вес.%Mn никелевого сплава ЭП741НП меняет механизм окисления на воздухе при 1000 °С в течение 30 часов с линейного закона ($\Delta m/S = 1{,}2176\tau - 1{,}8144$) на параболический ($\Delta m/S = 0{,}5621\tau^{0,5}$), что обусловлено образованием на поверхности двухслойного защитного слоя $Al_2O_3/CaMoO_4$ толщиной 20-27 мкм, уменьшающего скорость окисления в 16 раз.

К наиболее **значимым практическим** результатам работы следует отнести следующее:

- разработан способ получения новых структурно-однородных легкоплавких с узким интервалом плавления (15-20 °С) стержневых электродов с мелкозернистой структурой для электроискровой обработки. В Депозитарии ноу-хау НИТУ «МИСиС» зарегистрирован секрет производства (ноу-хау) «Способ получения структурнооднородных легкоплавких стержневых электродов Al-Si для электроискровой обработки» № 8-732-2021 ОИС от «31» мая 2021 г. Разработана технологическая инструкция на изготовление легкоплавких электродов на основе алюминия для электроискровой обработки изделий, ТИ № 50–11301236–2021.
- на основании проведенных исследований разработан способ электроискровой обработки аддитивных изделий для улучшения качества поверхности. В Депозитарии ноу-хау НИТУ «МИСиС» зарегистрирован секрет производства (ноу-хау) «Способ устранения дефектов и поверхностного упрочнения аддитивных изделий из сплавов на основе никеля и титана» № 9-732-2021 ОИС от «31» мая 2021 г. Разработана технологическая инструкция на процесс локальной электроискровой обработки легкоплавкими электродами изделий, полученных аддитивными технологиями, ТИ № 51–11301236–2021.
- проведено опробование электроискрового способа обработки эвтектическим электродом состава 98%Al-12 вес.% Si деталей защитной накладки композитной лопатки турбинного двигателя и роторной лопатки турбины высокого давления парового двигателя.

Степень обоснованности и достоверности каждого научного положения

Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, достаточно обоснованы и экспериментально проверены. Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждаются большим объемом экспериментальных данных, применением широкого спектра современного экспериментального и исследовательского оборудования и глубоким анализом полученных результатов в полном соответствии с современными концепциями материаловедения.

Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертациям

Выполнены все требования, предъявляемые к диссертациям. Проведен подробный анализ литературных данных, относящихся к теме диссертации, правильно установлены цели и задачи исследования, выбраны новые составы электродов и предложены оригинальные методики их осаждения. Экспериментальные результаты представлены четко, как в виде графиков и фотографий структур, так и текста, их описывающего. Работа написана ясным языком, хорошо иллюстрирована. Диссертация и автореферат содержат необходимые разделы и соответствуют друг другу.

Основные достоинства и недостатки по содержанию диссертации

Диссертационная работа Муканова С.К. выполнена на высоком уровне. Полученные результаты обладают научной новизной и имеют высокое фундаментальное и практическое значение, поскольку позволила выполнить ряд научных проектов.

К недостаткам по содержанию диссертации и автореферата следует отнести следующее:

1) Во введении отмечено, что ЭИО требует тщательной оптимизации процесса конкретных пар «электрод-подложка», так как в модифицированных поверхностях могут возникать поверхностные микротрещины, которые являются результатом различия в коэффициентах температурного линейного расширения фазовых составляющих электродов. Учитывалась ли эта величина при предварительном прогнозировании экспериментов?

2) В автореферате диссертации не приведены режимы ЭИО, используемые в работе.

3) В разделе 3 диссертации недостаточно обоснованна необходимость исследования жидкотекучести сплавов на основе Al.

4) В работе для модификации поверхности использовались легкоплавкие электроды на основе Al трех систем Al-Si, Al-Ca-Si и Al-Ca-Mn, однако экспериментальные исследования кинетики массопереноса приводятся только для электродов системы Al-Si.

5) На стр. 87-88 в Табл. 5.3 представлены результаты трибологических испытаний образцов до и после испытаний на жаростойкость. С чем связано повышение износостойкости образца после ЭИО электродом системы Al-Ca-Mn по сравнению с другими электродами?

6) В диссертации присутствует ряд грамматических и пунктуационных ошибок.

Однако отмеченные недостатки не снижают теоретической и практической значимости выполненных исследований, а полученные в диссертации результаты соответствуют поставленным целям.

Заключение

Диссертационная работа Муканова С.К. представляет собой законченное научное исследование, посвященная актуальной научной проблеме. В работе решен ряд важных задач, имеющие существенное значение для развития теории и практики электроискровой обработки материалов.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы и отражает основные полученные результаты. Положения диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 9 научно-технических конференциях всероссийского и международного уровня и отражены в 4-х статьях, опубликованных в рецензируемых журналах из перечня ВАК и международных баз данных Scopus и Web of Science, и 2 секретах производства (ноу-хау).

Считаем, что диссертационная работа Муканова С.К. «Реакционная электроискровая обработка для поверхностного упрочнения и выглаживания аддитивных поверхностей никелевых и титановых изделий» по экспериментальному, методическому и теоретическому уровням, объему работы, научной новизне, научной и практической значимости, актуальности полностью отвечает требованиям, предъявляемыми к кандидатским диссертациям, в том числе п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Муканов Самат Куандыкович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06. Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Отзыв составлен и принят на основании анализа диссертации, автореферата и публикаций Муканова С.К., обсуждения презентации доклада Муканова С.К. на заседании кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет», протокол № 1 от 31 августа 2021 года.

Заведующий кафедрой «Металловедение,
порошковая металлургия, наноматериалы»,
профессор, доктор физико-математических наук Амосов Александр Петрович
(01.04.17. Химическая физика, в том числе физика горения и взрыва)
Телефон: (846) 242-28-89. E-mail: egundor@yandex.ru

Ученый секретарь кафедры «Металловедение,
порошковая металлургия, наноматериалы»,
доцент, кандидат технических наук Пугачева Татьяна Михайловна
(05.16.01. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов)
Телефон: (846) 242-28-89. E-mail: t.pugacheva15@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, главный корпус
Тел.: 8 (846) 278-43-11, Факс: (846) 278-44-00, E-mail: rector@samgtu.ru

Подпись Амосова А.П.
заверяю.
Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО "СамГТУ" Юдина О.В.

08.09.2021 г.