



на правах рукописи

Еремкина Мария Сергеевна

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ  
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭНЕРГОУСТАНОВОК, ПОЛУЧЕННЫХ  
СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ

2.5.15. – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных  
аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Асланян Ирина Рудиковна  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры 205 «Технология производства двигателей летательных аппаратов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: Шехтман Семен Романович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Смелов Виталий Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент, директор института «Институт двигателей и энергетических установок» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Защита состоится «23» декабря 2024 года в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»: <http://www.mai.ru/events/defence>

Автореферат разослан: «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.327.06 д.т.н., доцент



Краев Вячеслав Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы диссертации.**

Одной из важнейших проблем внедрения аддитивных технологий при производстве деталей газотурбинных двигателей является отсутствие комплекса научных исследований, направленных на разработку технологического процесса по очистке готовой сложной поверхности от микрочастиц порошка с низкой адгезией после завершения изготовления изделия аддитивными методами, например, селективным лазерным сплавлением (СЛС). При наличии в составе готового изделия слабо держащихся частиц мелкодисперсного порошка использование, в частности, изготовленных аддитивными технологиями теплообменных и иных устройств в составе замкнутых гидравлических контуров систем терморегулирования космических аппаратов, становится невозможным.

С развитием малоразмерной авиации, номенклатура деталей из алюминиевых сплавов, получаемых СЛС значительно увеличивается. Перспективной данная технология является в производстве деталей и узлов цилиндро-поршневых групп (поршни, гильзы, цилиндры), воздухозаборника, картера и др. поршневых двигателей беспилотных летательных аппаратов. В процессе эксплуатации такие детали часто подвержены различным видам износа, коррозии, эрозии, окислению, заеданию при трении и т.д. При конструировании и изготовлении деталей двигателей летательных аппаратов (ДЛА) и энергетических установок (ЭУ) традиционными методами (литье, штамповка, ковка и т.д.) в технологические процессы эффективно внедрены операции по защите поверхностей деталей от перечисленных видов воздействий. Однако для деталей ДЛА и ЭУ, полученных СЛС из алюминиевых сплавов исследования в данной области малочисленны и находятся на начальном этапе.

В настоящей работе с целью повышения ресурса деталей двигателей летательных аппаратов и энергетических установок рассматриваются различные методы постобработки деталей, полученных селективным лазерным сплавлением из сплава системы  $AlSi10Mg$ , а также особенности нанесения функциональных покрытий на эти детали методами химического никелирования и микродуговым оксидированием (МДО).

В связи с изложенным **актуальность темы настоящей работы** определяется: в научном плане – необходимостью развития и использования современных представлений о процессах постобработки деталей, полученных СЛС, о технологиях нанесения покрытий на такие детали, определения и анализа экспериментально полученных данных по изнашиванию и коррозионной стойкости покрытий, в практическом отношении – разработкой технологии постобработки деталей двигателей летательных аппаратов и энергетических установок, полученных СЛС, разработкой технологии нанесения на них износостойких и коррозионностойких покрытий и практической реализации полученных результатов в элементах ДЛА и ЭУ.

**Степень разработанности темы.** Вопросам исследования нанесения покрытий посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ. Среди авторов отечественных работ наиболее важный вклад в разработанность темы внесли: М. М. Криштал, В. А. Федоров, Н.Ю. Дударева, Л.Н.

Лесневский, Ф.В. Кирюханцев-Корнеев, В.Д. Скопинцев, среди зарубежных авторов: Чунченг Ма, Донг Ченг, Ж. М. Рамазанова, М. Г. Замалитдинова, Л. Пеццато. и др.

Несмотря на многочисленные исследования, нанесение покрытий на элементы ДЛА и ЭУ, полученные аддитивными методами, широко не рассматривалось. Недостаточно изучены условия и технологические режимы формирования покрытий на синтезированных деталях. Также не в полной мере рассмотрены вопросы последующей постобработки элементов ДЛА и ЭУ после выращивания.

**Цель исследования:** повышение качества поверхности и свойств деталей ДЛА и ЭУ, полученных методами СЛС, посредством применения постобработки поверхности и нанесения функциональных покрытий.

**Задачи исследования:**

1. Анализ поверхностного слоя деталей из сплава AlSi10Mg, полученных методами СЛС и исследование возможности нанесения покрытий.
2. Анализ методов постобработки деталей, полученных методами СЛС.
3. Разработка технологических режимов по постобработке деталей ДЛА и ЭУ, полученных методами СЛС.
4. Исследование и анализ работы никелевых покрытий на деталях ДЛА и ЭУ, полученных методами СЛС.
5. Исследование и анализ работы МДО покрытий на деталях ДЛА и ЭУ, полученных методами СЛС.
6. Разработка технологических режимов по нанесению покрытий на детали ДЛА и ЭУ, полученных методами СЛС.

**Объект исследования:** процесс постобработки элементов ДЛА и ЭУ, полученных методами СЛС.

**Предмет исследования:** методика постобработки деталей ДЛА и ЭУ, полученных методами СЛС, методика нанесения покрытий на детали ДЛА и ЭУ, полученные методами СЛС, исследование функциональных свойств покрытий, сформированных на сложных геометрически развитых поверхностях деталей ДЛА и ЭУ, полученных методами СЛС.

**Научной новизной** обладают следующие результаты:

1. Установлено, что слабодержащиеся (с низкой адгезией) частицы алюминиевого порошка, налипшие на детали в процессе СЛС и неудаляющиеся механическим методом, возможно удалить последующим травлением деталей в растворе едкого натра. Показано, что длительность травления не должна превышать 60 с в связи с катастрофической деградацией поверхности образцов, выражающейся как в потере массы образцов, так и в появлении развитой системы микротрещин на поверхности деталей.

2. Установлено, что химические никель-фосфорные покрытия осаждаются на детали, полученные методом СЛС, из сплава AlSi10Mg в щелочном растворе при соблюдении условий: четырехступенчатая подготовка поверхности, время осаждения покрытия не более 90 мин.

3. Установлено, что при подготовке поверхности деталей ДЛА и ЭУ из сплава AlSi10Mg, полученных методом СЛС, для нанесения химических никель-

фосфорных покрытий на этапе осветления требуется увеличение времени осветления до 25-30 секунд в азотной кислоте в связи с особенностями структуры синтезированного сплава, а именно: ячеисто-дендритная структура с непрерывными цепочками фазы кремния вдоль границ ячеек.

4. Установлено, что при формировании МДО покрытий при режиме с параметрами: плотность тока  $25 \text{ А/дм}^2$ , время осаждения 120 минут на сплаве  $\text{AlSi10Mg}$  в растворе, содержащем жидкое стекло, в составе покрытия формируется муллит, обеспечивающий высокую коррозионную стойкость и высокую химическую стабильность формирующихся покрытий.

#### **Теоретическая и практическая значимость результатов исследования.**

1. Разработана комплексная методика постобработки деталей ДЛА и ЭУ, полученных методами СЛС, позволяющая облегчить удаление слабодержащихся (с низкой адгезией) частиц алюминиевого порошка, налипших на детали в процессе СЛС и неудаляющихся механическим методом. Разработанная методика приводит к удалению слабодержащихся частиц порошка и снижению шероховатости поверхности образцов на 20 %.

2. Разработаны технологические режимы по нанесению химических никелевых покрытий на поверхность деталей, полученных методом СЛС, из сплава  $\text{AlSi10Mg}$ . Предложенная технология обеспечивает получение равномерных сплошных  $\text{NiP}$  покрытий толщиной до 15 мкм, обеспечивающих снижение коэффициента трения и износа.

3. Разработаны технологические режимы по нанесению МДО покрытий на поверхность деталей, полученных методом СЛС, из сплава  $\text{AlSi10Mg}$ . Предложенная технология обеспечивает получение коррозионностойких МДО покрытий со средней толщиной покрытий 130 мкм, обеспечивающих снижение коэффициента трения и износа.

**Методология и методы исследования.** В настоящей работе применены теоретические и экспериментальные методы исследования. Решение поставленных задач основывается на известных теоретических положениях материаловедения, химии и трибологии, а также на экспериментальных данных, моделировании и многофакторном эксперименте. При проведении экспериментальных исследований применялись инструменты статистического анализа экспериментальных результатов, стандартизированные методы трибологических испытаний, измерения шероховатости и микротвердости. Для изучения структурных особенностей и фазового состава исследуемых материалов применялись современные методы, такие как оптическая металлография, электронная микроскопия и методы химического анализа.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты анализа качества поверхности деталей ДЛА и ЭУ, полученных методом СЛС, из сплава  $\text{AlSi10Mg}$ .

2. Обоснование выбора метода постобработки поверхности деталей ДЛА и ЭУ, полученных методом СЛС, из сплава  $\text{AlSi10Mg}$ .

3. Обоснование выбора покрытия для повышения функциональных свойств деталей ДЛА и ЭУ, полученных методом СЛС, и способов их формирования.

4. Оценка функциональных свойств химических никелевых покрытий, нанесенных на поверхности деталей ДЛА и ЭУ, полученных методом СЛС, из сплава AlSi10Mg.

5. Оценка функциональных свойств МДО покрытий, нанесенных на поверхности деталей ДЛА и ЭУ, полученных методом СЛС, из сплава AlSi10Mg.

6. Результаты практической проверки в лабораторных условиях и на реальных изделиях опытно-технологических процессов постобработки и нанесения покрытий на детали ДЛА и ЭУ, полученные методом СЛС из сплава AlSi10Mg.

**Личный вклад автора** заключается: в постановке задач и формулировании технических требований к экспериментальным исследованиям по определению основных эксплуатационных характеристик образцов, получаемых методом СЛС; в непосредственном участии в постановке и проведении экспериментов; в обработке экспериментальных данных.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих международных и всероссийских научно-технических конференциях: XXVII международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова (Калужская обл., г. Кремёнки, 2021 г.); XXII Научно-техническая конференция учёных и специалистов, посвященная 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основания ПАО «РКК «Энергия» (г. Москва, 2021г.); 20-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (г. Москва, 2021г.); XXVIII Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова (Калужская обл., г. Кремёнки, 2022 г.); 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (г. Москва, 2022 г.); XLIX Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (г. Москва, 2023 г.); Выставка HELIRUSSIA 2023, выступление на деловой программе – конференция «Аддитивные технологии в авиаиндустрии» (г. Москва, 2023 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 4 работы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и изданиях, приравненных к ним.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 128 наименований и 2 приложений. Общий объем диссертации составляет 140 страниц (включает 50 рисунков, 20 таблицу и 2 приложения).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дается общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель работы и задачи для её достижения, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Представлены положения, выносимые на защиту, а также апробация результатов и публикации по теме диссертационной работы.

**В первой главе** рассматриваются вопросы связанные с перспективностью применения аддитивных технологий для изготовления деталей ДЛА и ЭУ из алюминиевых сплавов. Рассмотрены особенности структуры деталей ДЛА и ЭУ, полученных селективным лазерным сплавлением из алюминиевых сплавов,

существующие методы постобработки синтезированных алюминиевых сплавов и функциональные покрытия, применяемые для алюминиевых сплавов. Проведенный литературный обзор позволил установить ряд факторов, имеющих существенное значение для дальнейших исследований. Во-первых, структура синтезированных сплавов AlSi10Mg имеет существенное отличие от литейных и представляет собой ячеисто-дендритную структуру с непрерывными цепочками фазы кремния вдоль границ ячеек, утолщающимися при увеличении содержания кремния. Во-вторых, высокая шероховатость и образование дефектов в синтезированных сплавах AlSi10Mg является критической проблемой в процессах СЛС. Для повышения качества полученных деталей и устранения внешних дефектов требуется постобработка и модификация поверхности, а именно – нанесение функциональных покрытий. В-третьих, постобработка является обязательным этапом изготовления деталей аддитивными технологиями, так как на сегодняшний день ни одна технология аддитивного производства не позволяет получить деталь, готовую к использованию сразу после печати: требуется не только исключение внутренних и внешних дефектов структуры синтезированных сплавов, а также удаление поддержек. И, наконец, синтезированные детали ДЛА и ЭУ, как правило, имеют сложно профилированную форму с развитыми внутренними полостями и поэтому при выборе постобработки следует рассматривать способы, позволяющие добиться обработки всех поверхностей деталей, в том числе внутренних с узкими каналами.

**Во второй главе** представлены материалы, методики и оборудование, используемые в настоящей работе. Для исследования в качестве подложки использовался алюминиевый сплав AlSi10Mg, полученный методом селективного лазерного сплавления. В качестве функциональных покрытий рассматривали NiP покрытия, полученные химическим осаждением и МДО покрытия.

**Третья глава** посвящена исследованию и анализу работы никель-фосфорных покрытий на деталях ДЛА и ЭУ, полученных методом СЛС.

Металлографическая структура исходной поверхности образцов, полученных методом СЛС представлена на рисунке 1. На поверхности образцов четко просматриваются отдельные спеченные гранулы порошка разных фракций, видны поверхностные дефекты структуры: поры, включения частиц порошка более мелкой фракции. Шероховатость образцов после изготовления методом СЛС составляет Ra ~16 мкм.

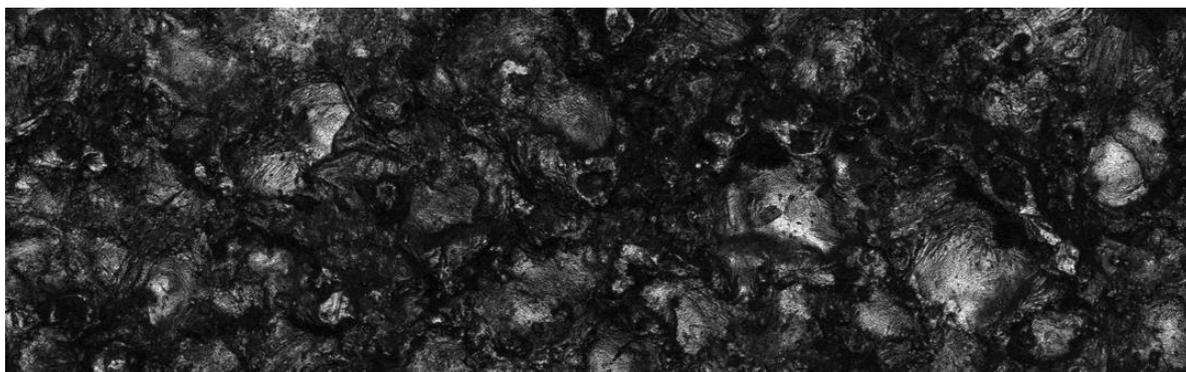


Рисунок 1 – Металлографическая структура образцов (×20)

Для удаления с поверхности частиц порошка с низкой адгезией к основной поверхности, а, следовательно, и снижения шероховатости была предложена трехступенчатая обработка поверхности химическим способом представленная в таблице 1.

Таблица 1 – Схема обработки поверхности

| №  | Наименование | Параметры процесса                                      | Состав раствора                                 |
|----|--------------|---|---|
| 1. | Травление    | $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\tau = 1, 3, 5$ мин | 10 % NaOH                                       |
| 2. | Осветление   | $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\tau = 5-10$ сек    | 30 % HNO <sub>3</sub>                           |
| 3. | Матирование  | $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\tau = 60$ сек      | 200г/л смеси 56 % NaNO <sub>3</sub> и 44 % NaOH |

Травление алюминиевых образцов при различном времени выдержки приводит к значительным изменениям поверхностного слоя. Визуально поверхность приобретает более сглаженный характер по сравнению с поверхностью после СЛС. При увеличении времени выдержки в щелочном растворе деградация поверхности увеличивается. Также на поверхности алюминиевых образцов при травлении в течении 5 минут отчетливо наблюдается послыйный характер выращивания материала.

Зависимости потери массы образцов при травлении и шероховатости от времени выдержки представлены на рисунках 2 и 3, соответственно. Из рисунка 2 видно, что после трех минут выдержки потеря массы образцов при дальнейшем выдерживании в растворе едкого натрия приобретает катастрофический характер: потеря массы образца с увеличением времени выдержки после 3 минут изменяется по параболе.

Из рисунка 3 видно, что основное удаление поверхностного слоя до 25 % происходит при травлении образцов в начальный момент времени. После выдержки образцов в щелочном растворе более 1 мин шероховатость снижается незначительно, несмотря на значительное разрушение поверхности.

Таким образом, постобработка, направленная на очистку поверхности от слабо держащихся частиц порошка, и, заключающаяся в травлении алюминиевых образцов в щелочном растворе едкого натра, не должна превышать 1 мин.

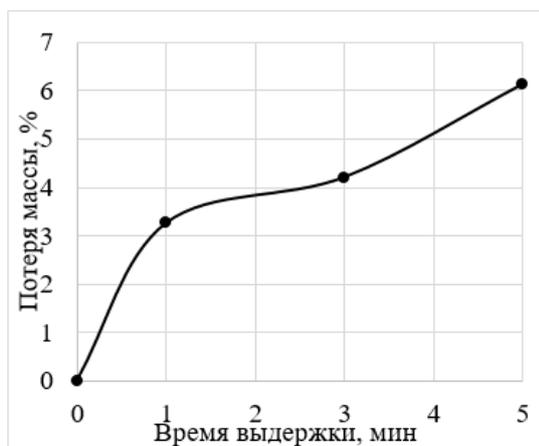


Рисунок 2 – Зависимость потери массы образцов от времени выдержки при травлении

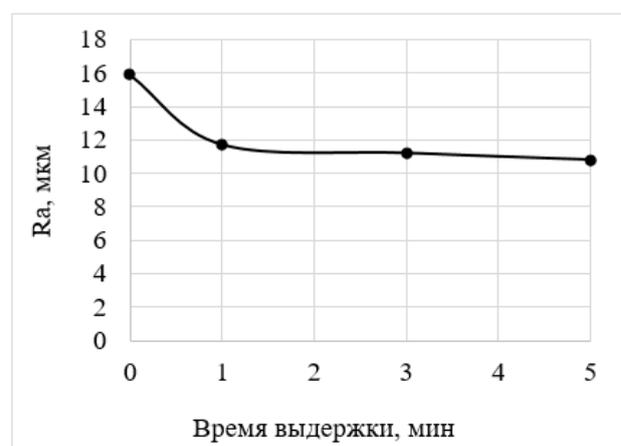


Рисунок 3 – Зависимость шероховатости образцов от времени выдержки при травлении

После травления на поверхности образцов наблюдался темный налет из нерастворимых в едком натре составляющих алюминиевого сплава. Удаление этого налета, а именно осветление поверхности проводили по режиму согласно таблице 1. После чего проводили направленное матирование с целью создания на поверхности равномерных штрихов. Изменения шероховатости и структуры поверхности образцов после осветления и матирования не наблюдались.

Таким образом, разработанная технология постобработки поверхности деталей из сплава AlSi10Mg, полученных методом СЛС, представленная в таблице 1 может применяться для удаления слабо держащихся частиц порошка, налипших в процессе сплавления на поверхность синтезированных деталей.

Далее исследовали принципиальную возможность нанесения химических никель-фосфорных покрытий на детали, полученные методом СЛС, из алюминиевых сплавов. В качестве прототипа была взята технология нанесения химических никель-фосфорных покрытий на литые детали из алюминиевых сплавов.

Традиционная технология химического никелирования деталей из алюминиевых сплавов состоит из предварительной подготовки поверхности и собственно никелирования. Предварительная подготовка поверхности включает четыре этапа, направленных на обеспечение лучшего сцепления покрытия с основой, и представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Схема обработки поверхности

| №  | Наименование | Параметры процесса |      | Состав   |
|----|--------------|--------------------|------|--|
|    |              | T, °C              | τ, с |  |
| 1. | Травление    | 60                 | 60   | 10 %-ный NaOH  |
| 2. | Осветление   | 20                 | 5-10 | 30 %-ный HNO <sub>3</sub>                                  |
| 3. | Матирование  | 20                 | 60   | 200 г/л смеси 56 %-ного NaNO <sub>3</sub> и 44 %-ного NaOH |
| 4. | Активация    | 20                 | 60   | 20 г/л H <sub>2</sub> SO                                   |

Для нанесения химического Ni-P покрытия применяли традиционный электролит химического никелирования щелочной следующего состава: хлористого никеля 46 г/л, гипофосфита натрия 20 г/л, хлористого аммония 50 г/л, лимоннокислого натрия 46 г/л при pH 8,0-9,0 и температуре ведения процесса 78-88 °C. Длительность процесса для изучения возможности нанесения химических Ni-P покрытий составляла 60, 75, 90 и 120 мин. Покрытия, осаждаемые в течение 120 минут, имели плохое качество сцепления с поверхностью образцов, начинали отслаиваться, поэтому в дальнейшем их не исследовали.

Исследования покрытий, нанесенных по технологии для литых алюминиевых сплавов, показали неудовлетворительное качество полученных покрытий. Полученные покрытия были неоднородны, имелось множество разрывов при любом времени их осаждения. Поэтому на следующем этапе исследований провели корректировку режимов предварительной подготовки поверхности.

В связи с тем, что основное отличие в структуре синтезированного AlSi10Mg и литого алюминиевого сплава заключается в разном содержании, распределении

и размерах частиц кремния, было предложено увеличить время операции осветления, направленной на растворение частиц кремния до 30 с, при сохранении остальных режимных параметров.

В результате измененной технологии нанесения покрытий получили покрытия равномерной толщины, с однородной структурой, без разрывов и пор (рисунок 4).

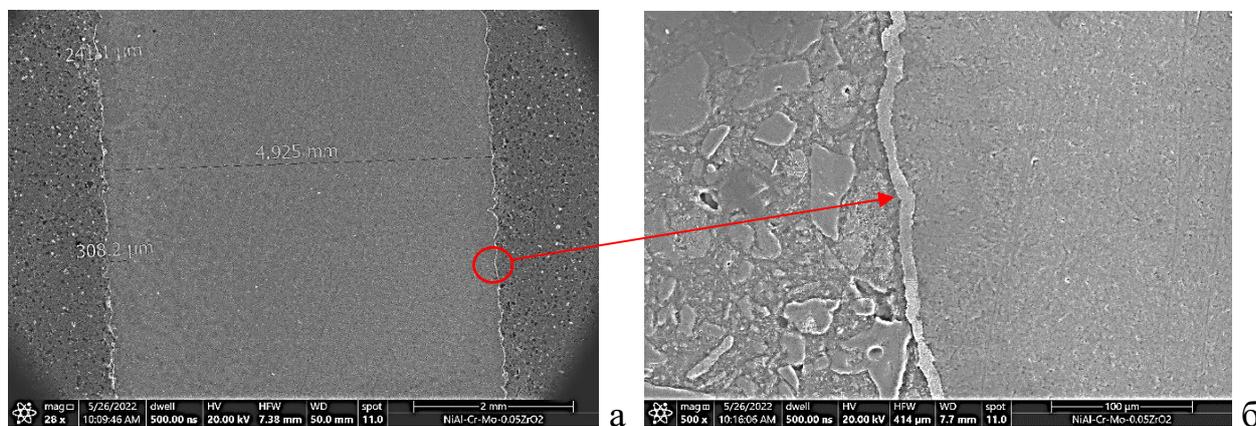


Рисунок 4 – Микроструктура поверхности образца с покрытием, осажденным в течение 60 минут

Толщина получаемых покрытий представлена на рисунке 5 в зависимости от времени осаждения 60, 75 и 90 минут, соответственно.

Для определения возможности нанесения химических NiP покрытий на внутренние полости деталей, полученных методом СЛС из алюминиевых сплавов, были выбраны образцы размером  $10 \times 10 \times 5$  мм. Каждый образец имел по четыре сквозных канала размерами  $\sim 0,5 \times 1,8$  мм и глубиной  $\sim 10$  мм. Общий вид образцов в поперечном сечении и размеры каналов до нанесения покрытий представлен на рисунке 6.

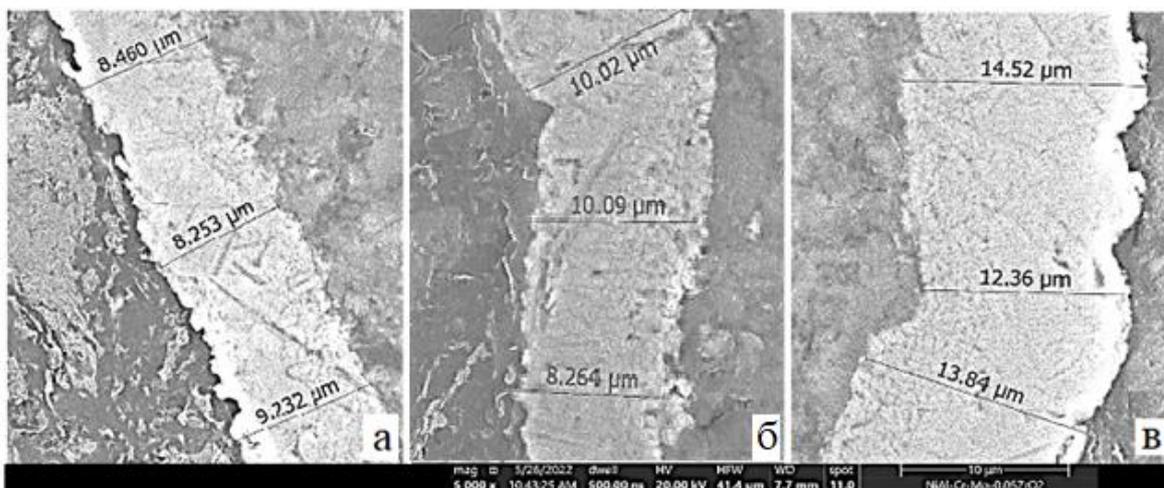


Рисунок 5 – Толщина покрытий, осаждение покрытий в течение: а) 60 мин; б) 75 мин, в) 90 мин



Рисунок 6 – Общий вид образца с каналами

После нанесения покрытий образцы разрезались по внутренним каналам для исследования осажденных на них покрытий. Исследования показали, что NiP покрытия были обнаружены на всех внутренних поверхностях каналов при времени осаждения 60, 75 и 90 минут. В таблице 3 представлены средняя толщина покрытий на внешней и внутренней поверхностях образцов в зависимости от времени осаждения. Общий вид покрытий, осажденных внутри каналов представлен на рисунке 7.

Таблица 3 – Средняя толщина покрытий на образцах

| Время осаждения, с | Толщина покрытия на внешней поверхности, мкм | Толщина покрытия на внутренней поверхности, мкм |
|--------------------|--|---|
| 60                 | 7-9  | 5-7   |
| 75                 | 9-11   | 7-9   |
| 90                 | 11-14  | 8-10  |

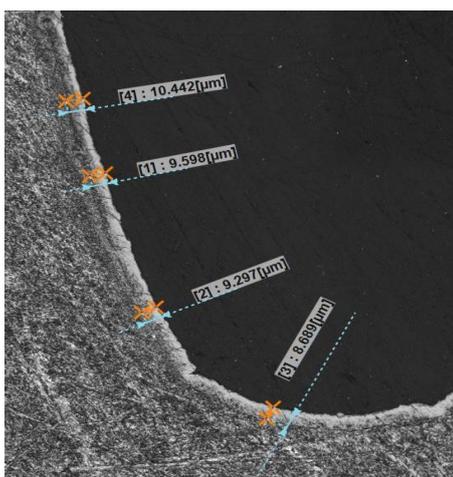


Рисунок 7 – Покрытие на внутренней поверхности канала при времени осаждения 90 мин ( $\times 50$ )

Результаты трибологических испытаний при фреттинг-изнашивании химических никель-фосфорных покрытий, нанесенных на детали, полученные методом СЛС представлены в таблице 4. Из таблицы видно, что покрытие защищает износ образцов из AlSi10Mg сплава, полученных методом СЛС. Износ образцов без покрытий в сопоставимых условиях трения в 3-4 раза больше, чем у образцов с покрытием.

На рисунке 8 представлены диаграммы коэффициента трения образцов с покрытием и без. Среднее значение коэффициента трения образцов из AlSi10Mg сплава, полученных методом СЛС, без покрытия составляет 0,3, а с покрытием – 0,28. Коэффициент трения образцов без покрытий (рисунок 8, а) имеет ярко

выраженный скачкообразный характер, что связано с высокой шероховатостью и особенностями структуры материала, полученного методом СЛС. Коэффициент трения покрытий (рисунок 8, б) имеет более сглаженный характер, что связано с уменьшением общей шероховатости поверхности после нанесения покрытий.

Таблица 4 – Результаты трибологических испытаний

| Покрытие/<br>подложка | Нагрузка,<br>Н | Линейный износ, мкм |      | Объемный износ, мкм <sup>3</sup> |         | Коэффициент трения |      |
|-----------------------|----------------|---------------------|------|----------------------------------|---------|--------------------|------|
|                       |                | Амплитуда, мкм      |      | Амплитуда, мкм                   |         | Амплитуда, мкм     |      |
|                       |                | 100                 | 200  | 100                              | 200     | 100                | 200  |
| AlSi10Mg              | 1              | 17,8                | 33,8 | 1407781                          | 6055798 | 0,30               | 0,30 |
|                       | 2              | 23,1                | 36,8 | 2215405                          | 6320750 | 0,38               | 0,38 |
| 60 мин                | 1              | 0,6                 | 14,7 | 13547                            | 1727037 | 0,21               | 0,25 |
|                       | 2              | 17,9                | 28,4 | 1271835                          | 5754941 | 0,26               | 0,28 |
| 75 мин                | 1              | 2,9                 | 0,7  | 165370                           | 21043   | 0,23               | 0,24 |
|                       | 2              | 28,5                | 34,2 | 1453488                          | 4733836 | 0,25               | 0,27 |
| 90 мин                | 1              | 4,1                 | 1,4  | 61733                            | 245122  | 0,22               | 0,26 |
|                       | 2              | 1,7                 | 26   | 120172                           | 6556559 | 0,28               | 0,28 |

Таким образом, объемный износ образцов с покрытиями в сопоставимых условиях трения в 3-4 раза меньше, чем у образцов без покрытий, коэффициент трения образцов с покрытиями также меньше, чем у образцов без покрытий. При повышении нагрузки до 2 Н лучшее сопротивление изнашиванию оказывают покрытия с временем осаждения 75 и 90 минут.

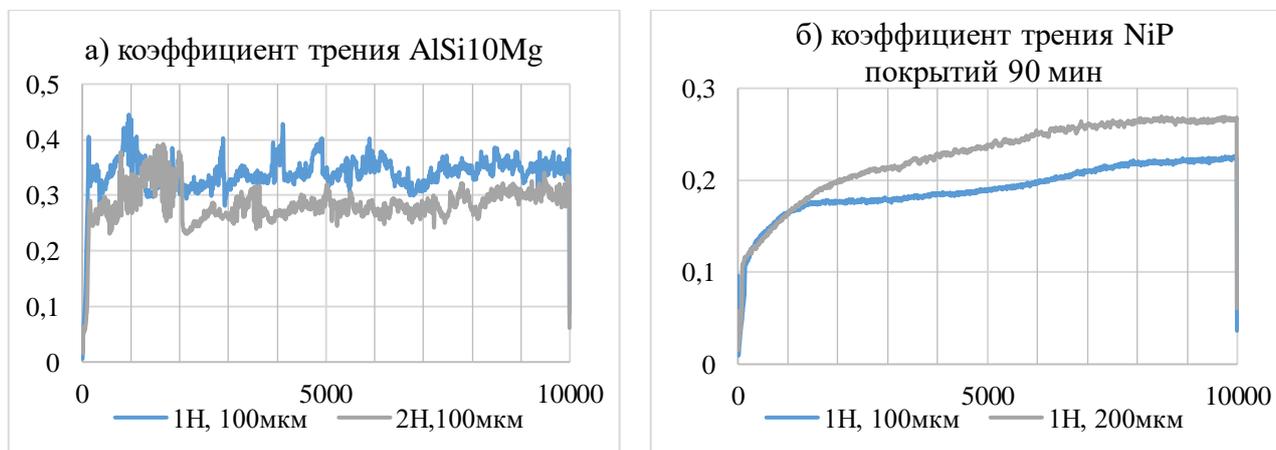


Рисунок 8 – Коэффициент трения образцов из AlSi10Mg сплава: а) без покрытия, б) с NiP покрытием

Использование полного факторного эксперимента при разработке химических никель-фосфорных покрытий для защиты синтезированных деталей ДЛА и ЭУ от фреттинг-изнашивания позволило определить степень влияния факторов на их износостойкость. В результате проведенных экспериментов установлено, что наибольшее негативное влияние на износостойкость химических NiP покрытий оказывают амплитуда сдвига и давление в зоне контакта. С увеличением этих факторов износ покрытий увеличивается.

В четвертой главе приведены результаты исследований и анализа характеристик, осажденных МДО покрытий на деталях ДЛА и ЭУ, полученных СЛС из сплава AlSi10Mg.

Процесс микродугового оксидирования осуществлялся в силикатно-фосфатном электролите, выбранном согласно исследованиям, проведенным на литых алюминиевых сплавах. Поскольку в литературе имеется большое число составов электролитов для МДО покрытий на литые алюминиевые сплавы, в данной работе определяли состав электролита, исходя из стабильности процесса, однородности структуры и прочностных свойств осаждаемых покрытий на алюминиевом сплаве, полученном СЛС, при времени осаждения 120 минут.

В проведенном исследовании лучшее соотношение микроструктуры и свойств, получаемых МДО покрытий, а также стабильности процесса нанесения покрытий показал состав №4, содержащий NaOH 3 г/л, жидкое стекло 10 г/л и  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$  10 г/л. Микротвердость полученных МДО покрытий в данном электролите составила 686 кгс/мм<sup>2</sup>, средняя толщина покрытия составила 130 мкм.

После определения оптимального состава электролита для нанесения МДО покрытий на детали из сплава AlSi10Mg, полученного методом СЛС, исследовали влияние времени оксидирования на структуру МДО покрытий. Время оксидирования образцов, как показано в таблице 5, варьировалось от 50 до 350 мин.

Таблица 5 – Время оксидирования образцов

| № эксперимента           | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   |
|--------------------------|----|-----|-----|-----|-----|
| Время оксидирования, мин | 50 | 120 | 150 | 190 | 350 |

На рисунке 9 представлен график изменения толщины покрытия в зависимости от времени оксидирования, где наблюдаются две точки перегиба: при времени осаждения 50 минут и 120 минут.

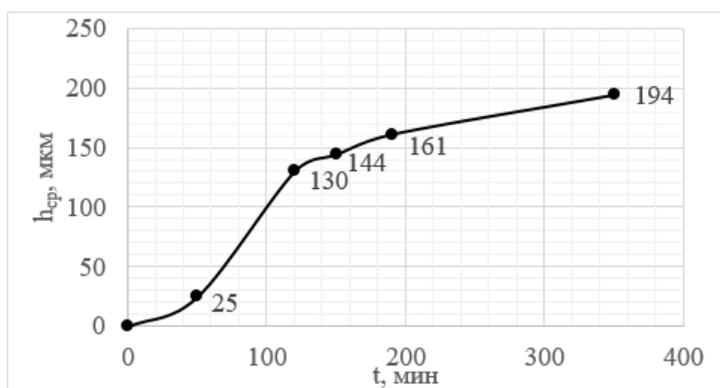


Рисунок 9 – Изменение толщины покрытия в зависимости от времени оксидирования

На снимках поперечных шлифов МДО покрытия (рисунок 10) видно, что на всех временных режимах обработки покрытие имеет слоистую структуру, характеризуется неравномерной толщиной покрытия и наличием пор, что характерно для такого рода покрытий. На первом образце, оксидированном при 50 минутах слой покрытия слабо выражены. На втором образце, при

времени оксидирования 120 минут, хорошо просматривается, что прилегающий к металлу слой покрытия имеет более плотную структуру, с однородной практически беспористой структурой толщиной ~ 40-50 мкм, основной процент пор приходится на внешний технологический слой («шубу»), что неизбежно при МДО.

Уже при 150 минутах оксидирования наблюдается трансформация плотного рабочего слоя, прилегающего к подложке, в пористый слой со значительным содержанием закрытых пор. С ростом времени оксидирования увеличивается

пористость по всей толщине покрытия, а также при оксидировании 350 минут наблюдаются трещины в покрытии и его разрушение.

Анализируя структуру покрытия, можно сделать вывод, что оптимальным временем оксидирования для сплава AlSi10Mg, полученного методом СЛС, в выбранном электролите является время 120 минут.

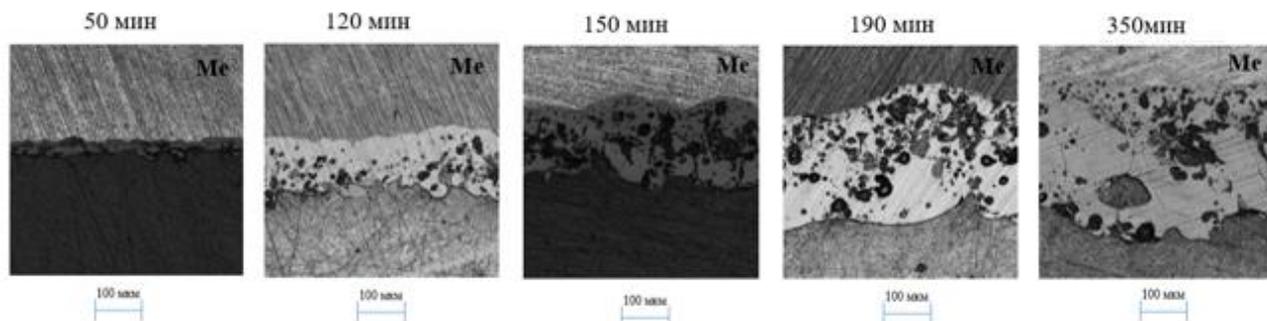


Рисунок 10 – Структура МДО покрытия на сплаве AlSi10Mg, полученного методом СЛС ( $\times 20$ )

Также в работе было проведено исследование влияния добавок нанодисперсного порошка  $\text{SiO}_2$  4 г/л с размером частиц 20-30 нм на структуру МДО покрытий при оксидировании сплава AlSi10Mg.

При определенном ранее оптимальном времени оксидирования 120 минут средняя толщина покрытия с диоксидом кремния в составе электролита составила 173 мкм, а без порошка 130 мкм, что на 24,9% больше (рисунок 11).

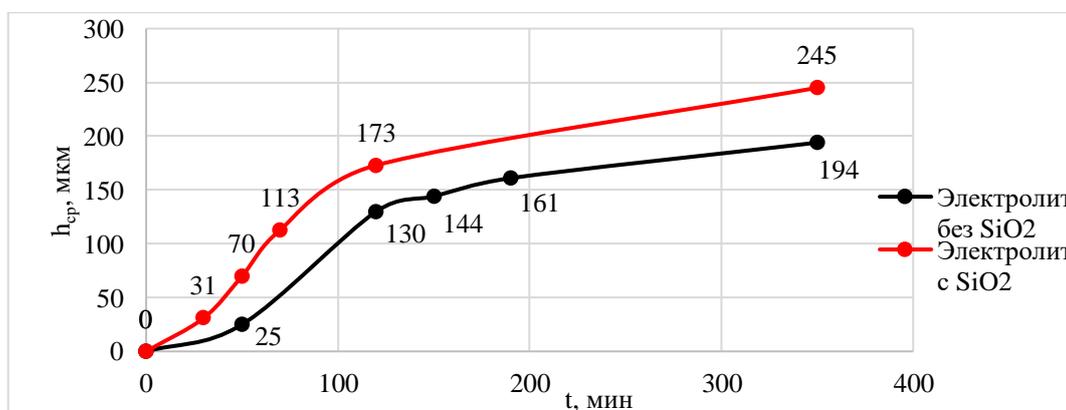


Рисунок 11 – Изменение толщины МДО покрытия

Из графика зависимости на рисунке 12 скорости роста покрытия от времени оксидирования видно, что скорость роста покрытия в электролите с нанодисперсным порошком  $\text{SiO}_2$  в составе электролита на протяжении всего процесса оксидирования существенно выше, чем в электролите без порошка. Максимальная скорость роста покрытия в электролите с порошком составляет 1,6 мкм/мин на времени оксидирования 70 минут. В стандартном электролите без порошка максимальное значение скорости роста покрытия 1,1 мкм/мин достигается при времени оксидирования 125-130 минут.

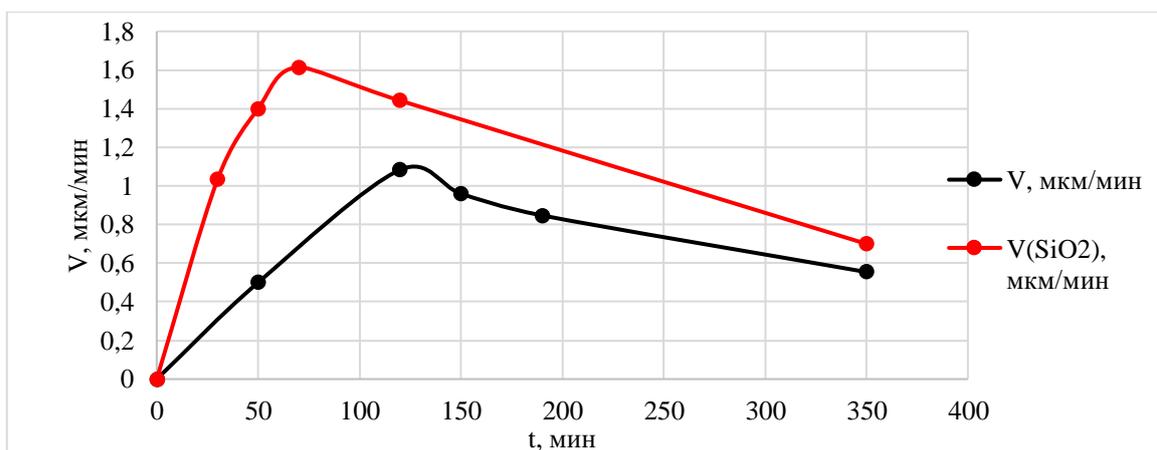


Рисунок 12 – Изменение скорости роста МДО покрытия

Испытания на коррозионную стойкость методом капли полученных покрытий показали, что все образцы имеют высокую стойкость к коррозии. В течение 50 минут воздействия раствора на покрытие продукты коррозии не были обнаружены на образцах. Следовательно, полученное покрытие имеет хорошую коррозионную стойкость.

В качестве эксперимента было предложено продолжить испытания на коррозию, с целью определения максимального времени воздействия коррозионного раствора на полученные покрытия до появления продуктов коррозии на поверхности (изменение раствора с оранжевого цвета на зеленый). Эксперимент показал, что наименьшую стойкость показал образец, полученный при оксидировании в течении 50 мин и имеющий наименьшую толщину покрытия. Время появления продуктов коррозии на нем составило 80 мин. На остальных образцах продукты коррозии не были обнаружены в течении 300 мин. Однако на самом алюминиевом сплаве AlSi10Mg, полученного методом СЛС, коррозия началась с первых минут воздействия раствора на поверхность.

Трибологические испытания МДО покрытий при фреттинг-изнашивании проводили на воздухе при амплитуде 100 мкм, нагрузке от 1 Н до 15 Н в течение 10000 циклов. В качестве контр-тела использовали стальной шарик ШХ-15 с целью моделирования реальных условий трения покрытий в деталях ДЛА и ЭУ. Результаты трибологических испытаний МДО покрытий в зависимости от приложенной нагрузки представлены в таблице 6 в виде объемного износа и глубины изнашивания.

Таблица 6 – Результаты трибологических испытаний при 10000 циклов

| Материал     | Нагрузка, Н         |        |                     |        |                     |        |                     |        |
|--------------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|
|              | 1                   |        | 5                   |        | 10                  |        | 15                  |        |
|              | Износ               |        |                     |        |                     |        |                     |        |
|              | V, мкм <sup>3</sup> | S, мкм |
| AlSi10Mg     | 1407781             | 17,8   | 2260391             | 19     | 2416662             | 17     | 3398577             | 23     |
| МДО покрытие | 12485               | 0,05   | 697008              | 1      | 1275715             | 7,7    | 2210754             | 10,8   |

Из таблицы видно, что с увеличением нагрузки износ МДО покрытий увеличивается. Также видно, что МДО покрытия являются достаточно прочными

и способны выдерживать значительные нагрузки. В связи с высокой шероховатостью и твердостью МДО покрытий при малых нагрузках (1 Н) износ покрытий минимален.

Микроструктура поверхности трения образцов из AlSi10Mg сплава, полученных методом СЛС, с МДО покрытием после фреттинг-изнашивания типична при любой нагрузке и представлена на рисунке 13.

Как видно из рисунка 13 трение МДО покрытий имеет абразивную природу, характерную для твердых материалов. Поверхность трения МДО покрытий имеет четкие границы с находящимися по краям продуктами износа. На поверхности трения имеются абразивные участки, а также поры со скапливающимися в них частицами износа. В виду высокой пористости МДО покрытий целесообразно их применение в смазывающихся местах трения. Смазка, затекая в поры покрытия, будет задерживаться на контактной поверхности и присутствовать в зоне трения постоянно, снижая их износ.

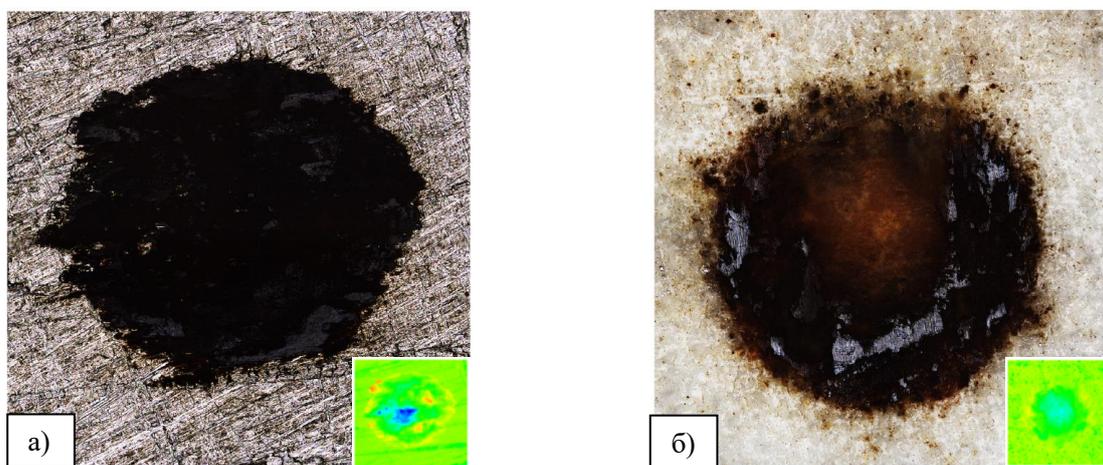


Рисунок 13 – Микроструктура поверхности трения при фреттинг-изнашивании (нагрузка 15Н, амплитуда 100 мкм, количество циклов 10000): а) – AlSi10Mg без покрытия, б) – МДО покрытие на AlSi10Mg ( $\times 20$ )

В связи с высокой твердостью МДО покрытий также были проведены более длительные трибологические испытания при нагрузке 5 Н, амплитуде 100 мкм и 50000 циклов. Результаты испытаний представлены в таблице 7 в виде объемного износа и глубины изнашивания. С увеличением длительности испытаний износ покрытий увеличивается незначительно. МДО покрытия имеют значительную толщину, высокую твердость и успешно сопротивляются износу по сравнению с образцами без покрытий. Таким образом, износ образцов с МДО покрытиями в сопоставимых условиях трения в 3 раза меньше, чем у образцов без покрытий.

Таблица 7 – Результаты трибологических испытаний при 50000 циклов

| Материал     | Нагрузка 5 Н                       |                       |
|--------------|------------------------------------|-----------------------|
|              | Объемный износ V, мкм <sup>3</sup> | Линейный износ S, мкм |
| AlSi10Mg     | 2860391                            | 20                    |
| МДО покрытие | 970936                             | 3                     |

В пятой главе приведены результаты разработки и рекомендации по практическому использованию результатов исследований.

*Результаты использования технологии постобработки внутренних каналов теплообменного аппарата системы обеспечения теплового режима космического аппарата, полученного селективным лазерным сплавлением из сплава AlSi10Mg.*

При обращении отдела систем терморегулирования космического аппарата (КА) предприятия ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева с проблемой засорения замкнутой гидравлической системы терморегулирования КА изготовленной СЛС были использованы результаты настоящего исследования, разработана и предложена схема химической постобработки готового изделия.

После изготовления одна из предоставленных предприятием термоплата была разрезана для контроля состояния внутренних каналов (рисунок 14). Осмотр показал значительное присутствие остатков порошка в малодоступных полостях термоплаты. Как видно из рисунка 14 размер частиц, находящихся в полостях термоплаты, составляет от 10 до 1000 мкм. Также четко видно, что часть частиц находится в незакрепленном положении, а часть прикреплена к внутренним стенкам каналов. Если незакрепленные частицы возможно удалить механическим способом – продувкой сжатым воздухом или промывкой, то закрепленные частицы этим способом удалить невозможно. В связи с чем готовая термоплата была подвергнута химической постобработке по разработанной схеме (таблица 1) с последующим нанесением NiP покрытия.

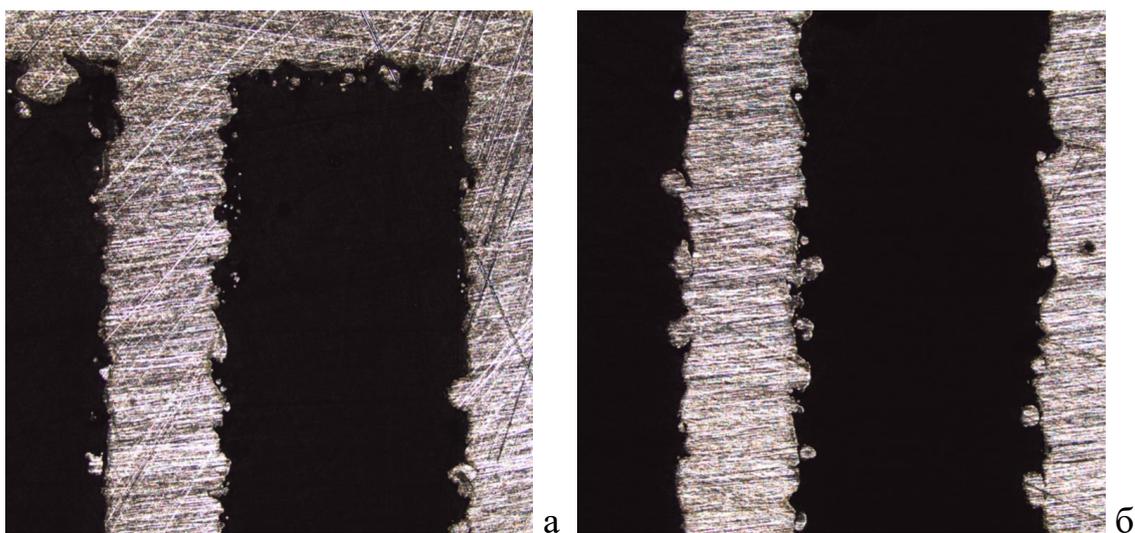


Рисунок 14 – Внутренние каналы термоплаты ( $\times 10$ )

В ходе проведения эксперимента по разработанной в главе 3 технологии химической постобработки из синтезированной термоплаты были удалены остатки порошка. Для предотвращения последующего возможного отделения частиц и загрязнения гидроконтра на термоплату, в том числе на внутренние поверхности каналов, было нанесено химическое никель-фосфорное покрытие. Время осаждения покрытия составляло 90 минут.

После окончания эксперимента термоплату разрезали для исследования внутреннего состояния каналов. Макроструктура внутренних каналов термоплаты после постобработки представлена на рисунке 15.

Как видно из рисунка 15, поверхность каналов после предложенной технологии имеет сглаженную поверхность, остатки порошка отсутствуют, наблюдается значительная разница в состоянии каналов до и после проведения

эксперимента. Также измеряли толщину нанесенного покрытия (рисунок 16). Эксперимент показал, что покрытия однородные без разрывов, хорошо наносятся на внутренние каналы термоплаты и имеют толщину в среднем 12 мкм.

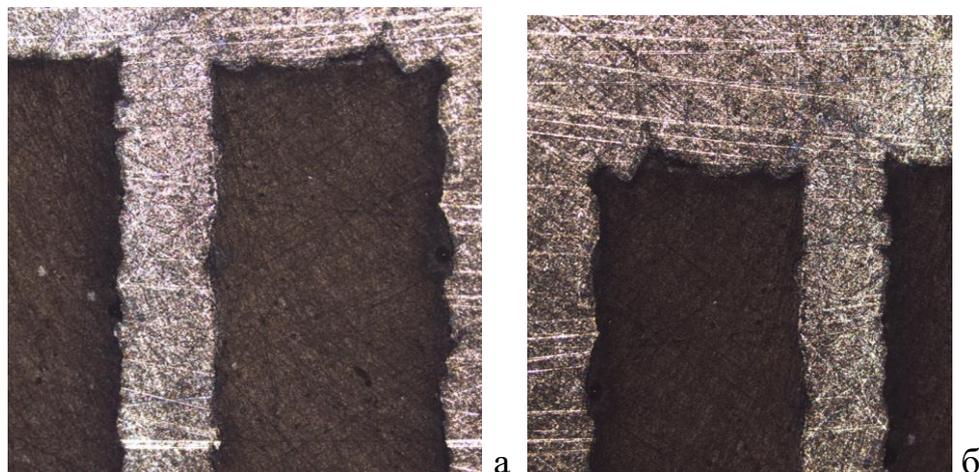


Рисунок 15 – Внутренние каналы термоплаты ( $\times 10$ )

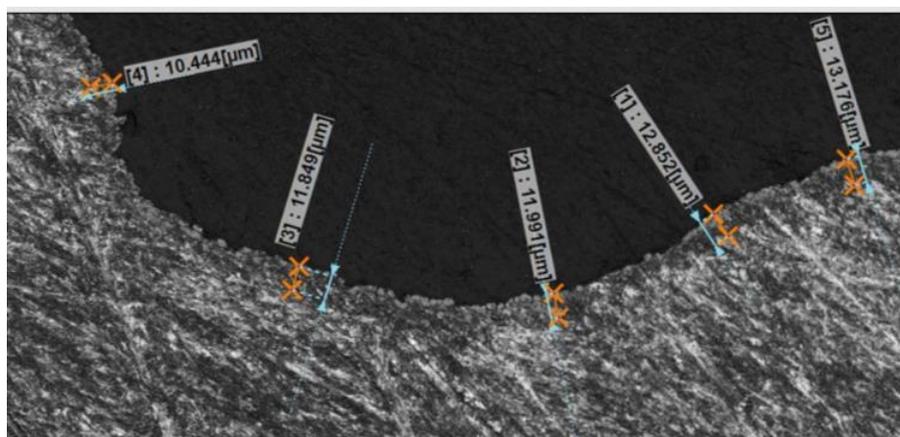


Рисунок 16 – Толщина NiP покрытия на внутренних каналах термоплаты ( $\times 50$ )

После выполнения данной работы был получен Акт об использовании результатов данного исследования, полученного от предприятия ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева. По заключению Акта разработанный процесс постобработки термоплаты может быть рекомендован к использованию при производстве термоплат теплообменного аппарата СОТР космического аппарата.

*Результаты использования технологического процесса МДО покрытий для защиты блока цилиндра поршневого двигателя БПЛА.*

Развитие беспилотной авиации в части применения двигателей внутреннего сгорания (ДВС) требует сокращения сроков создания и доведения до серии широкой номенклатуры изделий. В интересах компании ГК «ИКАР» были проведены инициативные работы кафедрой №204 «Авиационно-космическая теплотехника», совместно с кафедрой №205 при непосредственном участии автора, по разработке высокоэффективного ДВС (рисунки 17.1-17.4).

Принципиальной особенностью данного ДВС является требования по изготовлению цилиндра, а впоследствии, и картера, методом селективного лазерного сплавления.

Так как рабочая поверхность цилиндра двигателя в процессе работы одновременно подвергается абразивному, коррозионно-механическому и

молекулярно-механическому изнашиванию было предложено наносить покрытие методом микродугового оксидирования.

По разработанной в главе 4 технологии нанесения МДО покрытий на сплав AlSi10Mg на внутреннюю поверхность цилиндра нанесли МДО покрытие и провели испытания в масле, моделирующие условия нагружения поверхности цилиндра без учета температуры. Испытания проводили в масле при амплитуде 100 мкм, нагрузке 5 Н, длительность испытаний составляла 50000 циклов. Результаты испытаний представлены в таблице 8.



Рисунок 17.1 – ДВС 18 л.с.

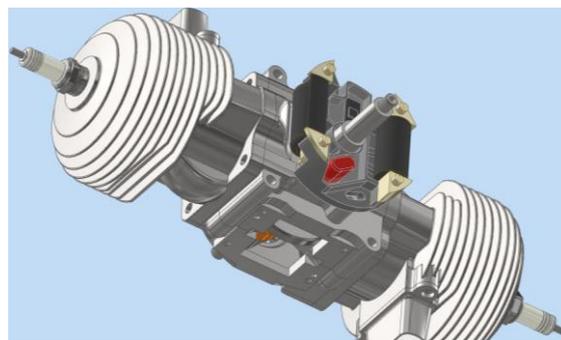


Рисунок 17.2 – Поршневая группа ДВС 18 л.с.



Рисунок 17.3 – Цилиндры ДВС, полученные СЛС, после механической обработки



Рисунок 17.4 – Примерка цилиндра на картер после СЛС

Таблица 8 – Результаты трибологических испытаний поверхности цилиндра

| Материал     | Нагрузка 5 Н        |        | Профиль изношенной поверхности контакта |
|--------------|---------------------|--------|---|
|              | V, мкм <sup>3</sup> | S, мкм |   |
| AlSi10Mg     | 436221              | 5,9    |   |
| МДО покрытие | 5347                | 0,02   |   |

Как видно из таблицы 8 износ МДО покрытий практически не наблюдается. Масло, заполняя многочисленные поры покрытия, надежно удерживается в зоне трения и снижает износ.

На рисунке 18 показаны поверхности трения МДО покрытия после проведения испытаний в масле. Пятно контакта размытое, не имеет четких границ продукты износа не наблюдаются.

Таким образом, проведенные в реальных условиях испытания показали, что МДО покрытия, нанесенные на детали ДЛА и ЭУ из сплава AlSi10Mg методом СЛС надежно защищают их поверхность от изнашивания.

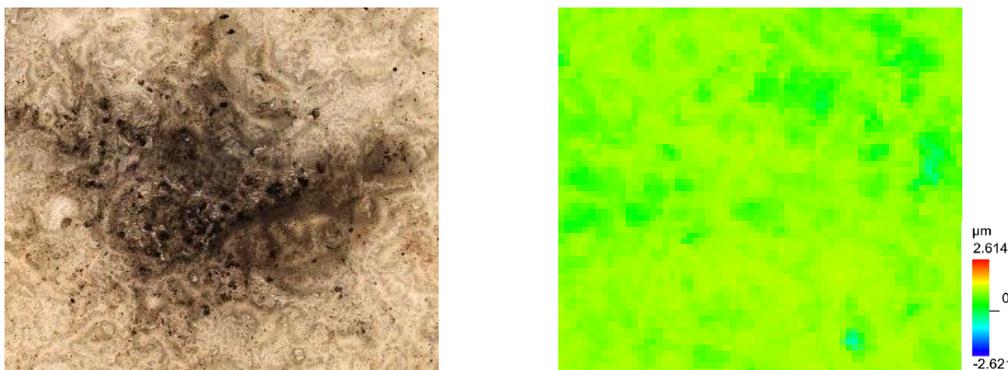


Рисунок 18 – Пятна износа на МДО покрытие после трения в условиях: масло в зоне контакта, нагрузка 5Н, 50000 циклов, перемещение 100 мкм

После выполнения данной работы был получен Акт об использовании результатов данного исследования, полученного от предприятия ГК «ИКАР». По заключению Акта разработанный процесс нанесения МДО покрытий может быть рекомендован к использованию при производстве двигателей внутреннего сгорания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на примере синтезированного сплава AlSi10Mg проведен комплекс экспериментальных и теоретических исследований по постобработке деталей ДЛА и ЭУ, обеспечивающей снижение шероховатости деталей, полученных методом СЛС, и повышение износостойкости и коррозионной стойкости за счет нанесения покрытий.

1. Проведен сопоставительный анализ способов постобработки деталей ДЛА и ЭУ, полученных методом СЛС. Показано, что для деталей из сплава AlSi10Mg, имеющих глубокие внутренние полости, подходит химическая постобработка. Установлено, что слабо держащиеся (с низкой адгезией) частицы алюминиевого порошка, используемого для изготовления изделий методом СЛС возможно удалить последующим травлением деталей в растворе едкого натра. Показано, что длительность травления не должна превышать 1 мин в связи с катастрофической деградацией поверхности образцов, выражающейся не только в потере массы образцов, но также появлении развитой системы микротрещин на поверхности. Технология постобработки внутренних поверхностей должна проводиться в три этапа, включающих травление, осветление и направленное матирование поверхности. Такая обработка приводит к удалению слабо держащихся частиц порошка и снижению шероховатости поверхности образцов на 26,4 %.

2. Установлено, что на образцах, изготовленных методом СЛС из сплава AlSi10Mg, возможно формирование равномерных никель-фосфорных покрытий методом химического осаждения, несмотря на высокую исходную шероховатость поверхности. Для обеспечения равномерности нанесения NiP покрытия требуется предварительная обработка поверхности, включающая в себя 4 этапа: травление в 10 %-ом растворе NaOH при температуре 60 °С в течении 30-60 секунд, осветление в 30 %-ом растворе HNO<sub>3</sub> при комнатной температуре в течении 25-30 секунд, матирование в растворе, содержащем 200 г/л смеси из 56 %-ного NaNO<sub>3</sub> и 44 %-ного NaOH при комнатной температуре в течении 50-60 секунд, активация поверхности в растворе, содержащем 20 г/л H<sub>2</sub>SO при комнатной температуре в течении 50-60 секунд. Для нанесения покрытий толщиной около 10 мкм длительность процесса должна составлять 75 мин. Показано, что формирующееся на поверхности деталей, полученных селективным лазерным сплавлением из сплава AlSi10Mg химическое NiP покрытие равномерно распределено как по поверхности осаждения, так и по своей толщине, не имеет пор и разрывов.

3. Установлено, что NiP покрытия успешно осаждаются на внутренние поверхности тонких каналов шириной 5 мм. При этом формирующиеся покрытия однородны без разрывов и также, как и на внешней поверхности образцов, успешно заполняют мелкие поры и другие дефекты поверхностных слоев. Толщина формируемых на внутренней стороне покрытий несколько меньше, чем на внешней поверхности и зависит от времени осаждения покрытий. При времени осаждения 60 мин толщина покрытия на внутренней стороне канала составляет 6 мкм, при времени осаждения покрытий 90 мин толщина покрытия на внутренней стороне канала – 9 мкм.

4. Трибологические испытания показали, что износ NiP покрытий имеет абразивно-окислительный характер для всех исследованных случаев. Механизм изнашивания покрытий одинаков для всех режимов фреттинга. Установлено, что с увеличением нагрузки износ образцов как с покрытием, так и без покрытия увеличивается. При постоянной нагрузке с увеличением амплитуды глубина изношенного слоя уменьшается, при этом общий объем изношенного материала увеличивается. Объемный износ образцов без покрытий в сопоставимых условиях трения в 3-4 раза больше, чем у образцов с покрытием. Показано, что коэффициент трения образцов без покрытий в среднем равен 0,3 и имеет ярко выраженный скачкообразный характер, что связано с высокой шероховатостью и особенностями структуры образца, полученного методом СЛС. Коэффициент трения покрытий равен 0,28 и имеет более сглаженный характер, что связано с уменьшением общей шероховатости поверхности после нанесения покрытий. Установлено, что при малых нагрузках 1 Н лучшее сопротивление изнашиванию оказывает покрытие с временем осаждения 60 мин. При повышении нагрузки до 2 Н лучшее сопротивление изнашиванию оказывают покрытия с временем осаждения 75 и 90 минут.

5. В рамках исследования разработки химических никель-фосфорных покрытий для защиты деталей ДЛА и ЭУ, полученных СЛС, от фреттинг-изнашивания был применён метод полного факторного эксперимента, что позволило определить степень влияния ключевых факторов процесса трения на

износостойкость покрытий, которыми являются амплитуда сдвига и давление в зоне контакта. С их увеличением наблюдается рост величины износа покрытий. Это указывает на необходимость контроля и оптимизации данных факторов для достижения максимальной износостойкости покрытий и, соответственно, продления срока службы деталей.

6. Определен характер роста МДО покрытия на сплаве AlSi10Mg, полученного методом СЛС. Выявлено, что основной прирост толщины покрытия происходит при времени осаждения от 50 до 120 минут. Оптимальным временем процесса оксидирования для достижения более однородной структуры покрытия в рабочем слое является 120 минут. При этом средняя толщина полученного покрытия составила 130 мкм.

7. Установлено, что модифицирование электролита нанодисперсным порошком диоксида кремния приводит к увеличению скорости роста МДО покрытия на сплаве AlSi10Mg, полученном методом СЛС, а, следовательно, к сокращению длительности процесса оксидирования для достижения требуемой толщины покрытия.

8. Установлено, что при формировании МДО покрытий при режиме с параметрами: плотность тока 25 А/дм<sup>2</sup>, время осаждения 120 минут на сплавах системы AlSi10Mg в силикатно-фосфатном электролите в составе покрытия формируется муллит, обеспечивающий высокую коррозионную стойкость в агрессивной среде и высокую химическую стабильность формирующихся покрытий, что и показали коррозионные испытания. Следовательно, МДО покрытия могут эффективно применяться в качестве защиты деталей ДЛА и ЭУ из алюминиевого сплава, полученных селективным лазерным сплавлением от коррозии.

9. В рамках данного исследования были разработаны технические решения, которые затем нашли практическое применение. На основе полученных результатов были определены технологические режимы по использованию новых технических разработок. Эффективность этих решений подтверждается актами об их применении.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и публикации, приравненные к ним**

1. Aslanyan I. R. Development of a Method for Cleaning the Surface of the Parts Produced by Additive Methods / I. R. Aslanyan, M. S. Eremkina, D. A. Zamyshlyayev, I. E. Mal'tsev // Russian Metallurgy (Metally). – 2023. – Vol. 2023, No. 6. – P. 703-708. – DOI 10.1134/s0036029523060101.

2. Еремкина М. С. Нанесение никелевых покрытий на детали энергоустановок из сплава AlSi10Mg, полученные селективным лазерным сплавлением / М. С. Еремкина, И. Р. Асланян // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2023. – Т. 27, № 2(100). – С. 53-59. – DOI 10.54708/19926502\_2023\_27210053.

3. Еремкина М. С. Исследование микродугового оксидирования на деталях из сплава AlSi10Mg, полученных методом селективного лазерного сплавления / М. С. Еремкина, И. Р. Асланян, И. А. Николаев // Вестник Уфимского

государственного авиационного технического университета. – 2023. – Т. 27, № 4(102). – С. 41-49.

4. Aslanyan I. R. Fretting-Wear of Chemical NiP Coatings Deposited on Parts for Aircraft Engines and Power Plants Obtained by Selective Laser Melting from AlSi10Mg Alloy / I. R. Aslanyan, M. S. Eremkina, A. V. Ionov // Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67, No. 1. – P. 138-144. – DOI 10.3103/S1068799824010161.

**Другие публикации:**

5. Басов А.А., Еремкина М.С., Караваев К.А., Кожевников Г.И., Лесневский Л.Н., Ляховецкий М.А., Мальцев И.Е., Николаев И.А. Микродуговое оксидирование в технологии защитных и твёрдых смазочных покрытий элементов космических аппаратов. Материалы XXVII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова – Калужская обл., г. Кремёнки, санаторий «Вятичи», 17 – 21 мая 2021 г. – Т. 1. – М.: ООО «ТРП», 2021. – С. 38 – 39.

6. Еремкина М.С., Лесневский Л.Н., Николаев И.А. Характеристики МДО покрытий на сплаве АЛ9, полученные методом планирования эксперимента. Тезисы докладов XXII Научно-технической конференции ученых и специалистов, посвященной 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основания ПАО «РКК «Энергия», г.Королев, 8-12 ноября 2021г. – С. 555 – 558.

7. Еремкина М.С., Лесневский Л.Н., Ляховецкий М.А., Николаев И.А. Исследование обрабатываемости методом микродугового оксидирования сплава AlSi10Mg, полученного методом селективного лазерного плавления. 20-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 22-26 ноября 2021 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2021. – С. 104 – 106.

8. Басов А.А., Еремкина М.С., Денисов Л.В., Лесневский Л.Н., Мальцев И.Е., Николаев И.А., Агафонов М.Д., Никитин И.А. Исследование влияния электроискрового легирования на свойства поверхности сплава AlSi10Mg, полученного методом селективного лазерного сплавления. Материалы XXVIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова – Калужская обл., г. Кремёнки, санаторий «Вятичи», 16 – 20 мая 2022 г. – Т. 1. – М.: ООО «ТРП», 2021. – С. 35 – 36.

9. Еремкина М.С., Асланян И.Р. Химическое травление как элемент постобработки поверхности деталей ДЛА, полученных методом селективного лазерного. 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 22-26 ноября 2022 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2022. – С. 116– 118.

10. Еремкина М.С., Якубов Д.И. Исследование возможности нанесения никель-фосфорных покрытий на детали ДЛА и ЭУ из сплава AlSi10Mg, полученные селективным лазерным сплавлением. XLIX Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения»; г. Москва. 11-14 апреля 2023 г.