

УДК 623.486: 621.373.8: 669.721.5

**Исследование возможности практического применения волоконных технологических лазеров в задачах ремонтного восстановления деталей авиационной техники**

Никитин А.И.<sup>1,2</sup>; Кульчин Ю.Н.<sup>2</sup>, д.ф.-м.н., Гнеденков С.В.<sup>3</sup>, д.х.н.;  
Иванов М.Н.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н.; Ионов А.А.<sup>1</sup>, д.ф.-м.н.; Машталяр Д. В.<sup>3</sup>, к.т.н.;  
Пивоваров Д.С.<sup>2</sup>; Синябрюхов С.Л.<sup>3</sup>, д.х.н.; Субботин Е.П.<sup>2</sup>, к.ф.-м.н.;  
Шпаков А.В.<sup>1</sup>; Яцко Д.С.<sup>2</sup>

[anikitin@iacp.dvo.ru](mailto:anikitin@iacp.dvo.ru)

<sup>1</sup>*Открытое акционерное общество "322 Авиационный ремонтный завод" (ОАО «322 АРЗ»)*

<sup>2</sup>*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН)*

<sup>3</sup>*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИХ ДВО РАН)*

***Аннотация:***

*На основании проведенных исследований, показано, что внедрение промышленных лазерных технологий в процессы выполнения работ по восстановлению летной годности воздушных судов позволит авиационным сервисным центрам расширить технологическую базу современной металлообработки при решении оперативных задач ремонта.*

***Ключевые слова:***

*авиаремонт, лазерная сварка, плазменное электролитическое окисление, магний, алюминий, сталь.*

**Введение**

По ряду сложившихся объективных причин одной из проблем авиаремонтных предприятий является восстановление литых деталей из магниевых, алюминиевых сплавов и коррозионностойкой высокопрочной стали. Их номенклатура исчисляется тысячами единиц. Характер повреждений таких деталей в процессе эксплуатации авиационной техники, как правило, у всех одинаков – механические трещины и коррозионные повреждения корпуса. В настоящее время, в соответствии с действующими нормативными документами, регламентирующими техническое обслуживание и ремонт летательных аппаратов, литые детали из магниевых, алюминиевых сплавов и коррозионностойкой высокопрочной стали, имеющие дефекты и повреждения корпусов относятся к категории «неисправных» и подлежат замене. Причиной принятия такого решения является отсутствие технологий металлообработки, позволяющих восстанавливать изделия авиационной техники из материалов МЛ-5, АК4-1Ч, ВЛ-3 методом сварки и наплавки. В Приморском крае расположено единственное на Дальнем Востоке предприятие – ОАО «322 Авиационный ремонтный завод», которое занимается ремонтом авиационной техники для нужд Министерства обороны Российской Федерации в рамках государственного оборонного заказа. ФГБУН Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН (ИАПУ ДВО РАН) совместно с ОАО «322 АРЗ» и ФГБУН Институт химии ДВО РАН (ИХ ДВО РАН) выполнен цикл комплексных исследований в рамках НИР «Лазерная сварка и лазерная порошковая наплавка сплавов на основе магния, алюминия и коррозионностойкой

высокопрочной стали». Для этого в ИАПУ ДВО РАН была также создана совместно с ОАО «322 АРЗ» «Совместная отраслевая лаборатория лазерных технологий», в которой выполнены работы по исследованию возможности практического применения волоконных технологических лазеров высокой мощности [1] в задачах оперативного ремонтного восстановления деталей авиационной техники ранее не подлежащих ремонту.

### Материалы и методы исследований

В качестве материалов для исследования выбраны следующие металлы. Литейный магниевый сплав МЛ5 системы Mg-Al-Zn [2], по составу соответствует ГОСТ 2856-79. Алюминиевый сплав марки АК4-1Ч системы Al-Cu-Mg-Fe-Ni, по составу соответствующий требованиям ОСТ1 90117-83. Коррозионностойкая высокопрочная сталь 08X14H5M2ДЛ (ВНЛ-3), по составу соответствующая требованиям ОСТ1 90090-79.

Для лазерной порошковой наплавки использовался порошок чистого магния МПФ-1 ГОСТ 6001-79. Физико-химические свойства и химический состав МПФ-1 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-химические свойства магниевого порошка

Дисперсность		Плотность (г/см <sup>3</sup> )	Химический состав (мас. %)			
Размер гранул (мкм)	Массовая доля (%)		Mg	Fe	Cl	H <sub>2</sub> O
> 160	< 0.3	0.45–0.49	99	0.05	0.005	0.1
100–160	5–10					
80–100	18–48					
56–80	25–50					
< 56	12–28					

Порошок магния имеет размер частиц от 8 до 160 мкм, тогда как большая часть массы содержится в зернах диаметром 56–80 мкм. Частицы порошка имеют неправильную, несферическую форму (рисунок 1).



Рис. 1 – Увеличенное изображение порошкового материала – чистого магния, используемого для лазерной порошковой наплавки

Объектом проведенных исследований являлись технологические операции «лазерной сварки» и «лазерной порошковой наплавки», выполняемые в автоматическом режиме с использованием лабораторного роботизированного технологического комплекса лазерной сварки и порошковой наплавки, в составе:

- 1) промышленный робот KUKA KR 30 HA;
- 2) волоконный лазер ЛС–1–К;
- 3) оптическая головка сварочная IPGP FLW–D50 (рисунок 2) укомплектованная коаксиальным соплом (кольцевой поток) и соплом 4–х сторонней подачи порошка (модуль 4W - PRECITEC);
- 4) порошковый питатель ПП–7103 (Плазмаавтоматика);
- 5) изолированная камера (рисунок 3);
- 6) соответствующее программное обеспечение робота-манипулятора и волоконного лазера.

а

б



Рис. 2 – Внешний вид лабораторного роботизированного технологического комплекса «лазерной сварки» и «лазерной порошковой наплавки»  
а – промышленный робот KUKA KR 30 HA, волоконный лазер ЛС-1-К, оптическая головка сварочная IPGP FLW-D50, б – металлографический микроскопе МЕТАМ ЛВ-41 и микротвёрдомер ПМТ-3М

Изолированная камера предназначена для работы с пожароопасными материалами и обеспечивает создание регулируемой защитной среды из технологических инертных газов и их смесей. На рисунке 3 верхняя крышка камеры не представлена.

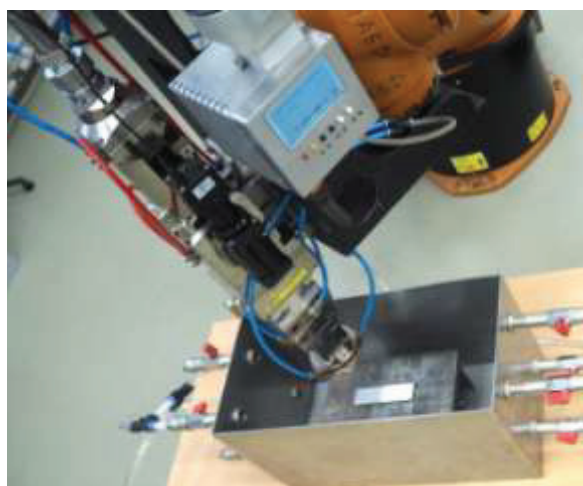


Рис. 3 – Внешний вид изолированной камеры и порошкового питателя ПП-7103 предназначенных для выполнения технологической операции «лазерной порошковой наплавки»

По завершению операции лазерной сварки пластин из алюминиевого сплава марки АК4-1Ч выполнялась их термическая обработка путем

закалки с последующим искусственным старением. Для этого использовались: сушильный шкаф SNOL 67/350 и муфельная печь SNOL 4/1300.

Поскольку проблемы коррозии и антикоррозионной защиты авиационной техники являются актуальными, в процессе экспериментальных исследований применялась технология плазменного электролитического оксидирования (ПЭО) наплавленной поверхности на деталях из магниевых сплавов. ПЭО формировалось в силикатно-фторидном электролите ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  – 15 г/л; NaF – 5 г/л) на установке, оснащенной автоматизированной системой управления и контроля, а также соответствующим программным обеспечением. В качестве источника тока использовался реверсивный тиристорный агрегат ТЕР4–100/460Н–2–2УХЛ4 номинальной мощностью 29 кВт, работающий от трехфазной сети 380 В, 50 Гц.

Электрохимические измерения ПЭО-покрытий проводили с помощью электрохимической системы VersaSTAT MC (Princeton Applied Research, США) в трехэлектродной ячейке при комнатной температуре в 3%-м растворе хлорида натрия.

Микроструктура сварного соединения исследована на оптическом металлографическом микроскопе МЕТАМ ЛВ–41. Измерения микротвердости металлов выполнены на микротвёрдомере ПМТ–3М (рисунок 2б), с использованием программного обеспечения «ММС Микротвердость», в соответствии с ГОСТ 9450-76.

Рентгеновский контроль проводили с использованием рентгеновского аппарата РАП-220-5 в соответствии с ОСТ1 90427 и производственной инструкцией ПИ 1.2.226-2008.

### **Результаты исследований**

Лазерная сварка конструкций из магниевого сплава МЛ5.

Лазерная обработка магниевого сплава имеет свои характерные особенности, связанные с оптическими и теплофизическими характеристиками процесса: низкая поглощательная способность магния для лазерного излучения длиной волны 1,07 мкм, большая теплопроводность и склонность металла к воспламенению при нагреве. В связи с этим, на практике лазерная сварка сплава МЛ5 требует особых условий обработки в защитной газовой среде с соблюдением специальных требований безопасности [3–6].

Руководствуясь ранее полученными результатами лазерной обработки конструкционных материалов [7–11], в том числе и МЛ5, проведены исследования возможности использования мощного лазерного излучения для сварки сплава на основе магния.

Информация о параметрах лазерного излучения и защитной среды, для сварки пластин толщиной не более 4.0 мм представлена в таблице № 2.

Таблица 2

Параметры технологической операции лазерной сварки сплава МЛ5

$P_L$ мощность лазерного излучения (Вт)	$V$ скорость перемещения лазерного пучка (мм/с)	$h$ высота от края лазерной головы до обрабатываемой поверхности (мм)	Положение фокуса лазерного излучения относительно поверхности детали (+ - ниже фокуса ЛИ – - выше фокуса ЛИ) (мм)	Параметры защитной среды Гелий		Параметры защитного газа Гелий	
				$P$ давление защитного газа (МПа)	Расход газа (л/мин)	$P$ давление защитного газа (МПа)	Расход газа (л/мин)
850 - 700	7	5	+5	0,4	5	0,4	40

Примечание:

Значение мощности лазерного излучения  $P_L$  плавно изменялось в процессе формирования сварного шва от 850 до 700 Вт.

С целью выявления поверхностных и внутренних дефектов сварного шва проводился рентгенографический контроль (рисунок 4).

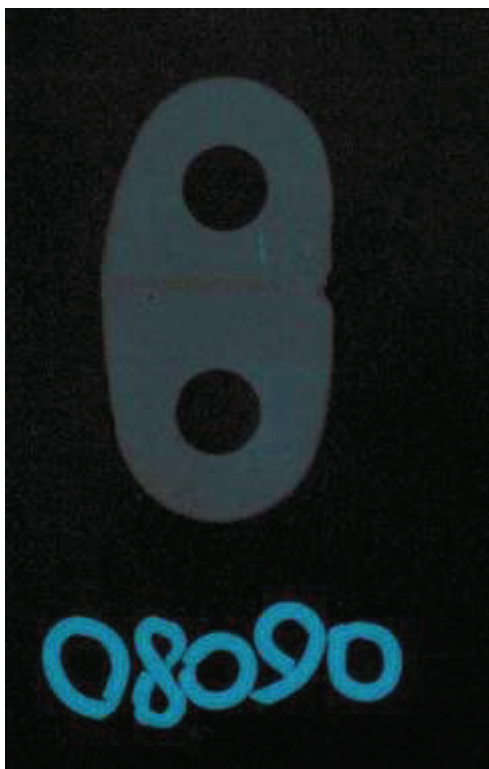


Рис. 4 – Рентгеновский снимок сварного шва

Как было установлено в ходе экспериментов, значительных газовых пор и микротрещин в образцах на полученных снимках не обнаруживается.

Для определения механических свойств сварного соединения из магниевого сплава МЛ5 проводились микромеханическое испытание образца – «стыкового сварного соединения без раздела кромок», методом исследования микротвердости.

Исследовались: основной металл (сплав МЛ5), зона термического влияния (ЗТВ) и металл шва, образованный переплавленным основным металлом.

Результаты распределения микротвердости материала МЛ5 полученные с применением программы анализа микротвердости представлены в таблице 3.



Таблица 3

Микротвёрдость трех характерных зон сварного соединения сплава МЛ5 полученного методом лазерной сварки (HV)

Зоны сварного соединения	Металл сварного шва	ЗТВ	Основной металл
Среднее значение микротвёрдости	127,1±1,9	72,1±1,1	73,3±1,3

Полученные в целом положительные результаты выполнения технологической операции лазерной сварки сплава МЛ5 позволили выполнить восстановление неисправной деталей «кронштейн самолета СУ-25, чертежный номер 81.5102.0385.001» (рисунок 5).



Рис. 5 – Внешний вид кронштейна самолета СУ-25 81.5102.0385.001 до и после ремонтного восстановления методом лазерной сварки: а – при поступлении в ремонт (1 – место излома проушины), б – после лазерной сварки, в – после механической обработки и последующей покраски

#### Лазерная порошковая наплавка магниевого сплава МЛ5.

В процессе проведения исследовательских работ по лазерной порошковой наплавке магниевого сплава МЛ5 была проанализирована динамика движения газопорошковой смеси и определены параметры зоны взаимодействия сфокусированного лазерного излучения с магниевым порошком МПФ–1. На рисунке 6 представлены варианты истечения газопорошковой смеси (ГПС) из коаксиального сопла и сопла 4–х сторонней подачи ГПС в рабочую зону при давлении транспортного газа  $0,15 \pm 0,03$  МПа и его расходе  $6,5 \pm 0,5$  л/мин.

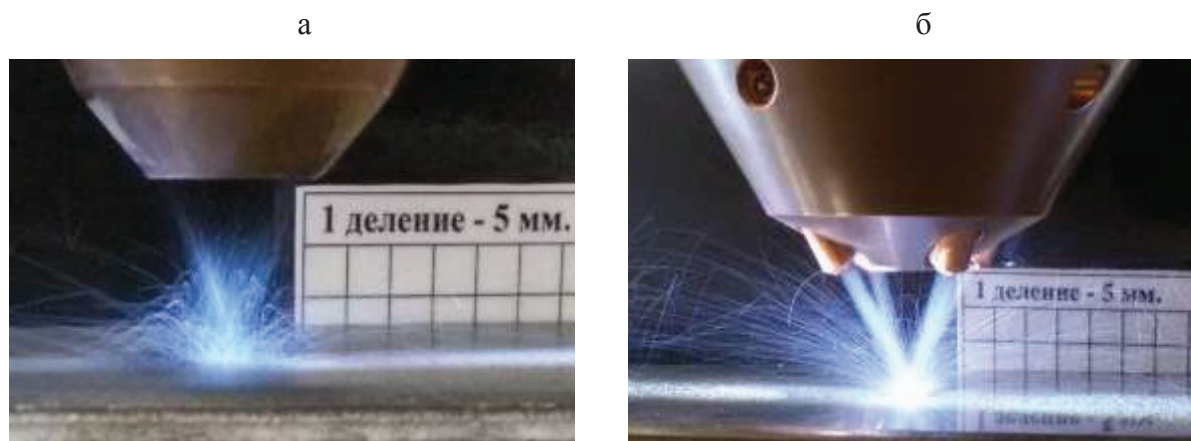


Рис. 6 – Варианты динамики газопорошковой смеси  
а – коаксиальное сопло (кольцевой поток);  
б – сопло с 4-х сторонней подачей порошка (модуль 4W)

Используя систему высокоскоростной съемки Photron FastCam Multi Camera Head HS-01 type 750K-M, в процессе экспериментального исследования определена область взаимодействия газопорошковой смеси со сфокусированным лазерным пучком (рисунок 7).

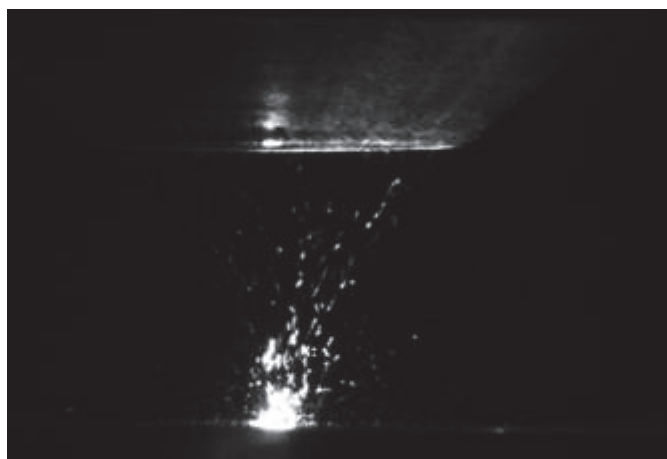


Рис. 7 – Область взаимодействия сфокусированного лазерного пучка с газопорошковой смесью. Кадр высокоскоростной съемки

Экспериментально определено рабочее расстояние  $H_1$  от среза сопла до обрабатываемой поверхности (области максимальной концентрации ГПС):  $H_1 = 14,0 \pm 0,5$  мм. Диаметр разлета 70% массы порошкового материала составляет 12,0 мм, не более. С учетом полученных результатов

проведены экспериментальные исследования процесса формирования объемных образцов из порошка чистого магния на подложке из сплава МЛ5. Используя разработанные программные продукты синхронного движения робота–манипулятора, подачи защитного газа, газопорошковой смеси и активации лазерного излучения получена объемная фигура в форме параллелепипеда: 45×15×4.5 мм (рисунок 8).



Рис. 8 – Внешний вид объемного образца, полученного методом лазерной порошковой наплавки из порошка чистого магния  
Особенности структуро- и формообразования объемного образца (рисунок 8).

Физическая структура образца состоит из 18 последовательно наплавленных слоев.

Лазерная порошковая наплавка первого слоя (наплавка порошка магния на основу – сплав МЛ5) выполнялась с использованием сопла с 4-х сторонней подачей порошка (рисунок 6б) при мощности непрерывного лазерного излучения 350 Вт.

С учетом теплофизических характеристик обрабатываемого материала, формирование последующих 17-ти слоев, выполнялось при мощности непрерывного лазерного излучения 310 Вт.

Перекрытие наплавленных валиков в одном слое не более 5 %.

Перекрытие наплавленных валиков между слоями не более 50 %.

Полученная микроструктура характеризуется довольно мелким зерном из-за быстрого затвердевания, что приводит к высокой относительной плотности наплавленного материала (таблица 4).

Таблица 4

Характеристика плотности и пористости образцов, изготовленных из магниевого порошка МПФ–1 методом лазерной порошковой наплавки

Материал	Пористость %	Плотность г/см <sup>3</sup>	Относительная плотность %
Наплавленный слой	6	1.622	93.3
МЛ5	0	1.738	100

Метод плазменного электролитического оксидирования один из наиболее перспективных видов поверхностной обработки изделий из металлов и сплавов, получивших в последнее время широкое распространение в различных отраслях промышленности для формирования многофункциональных износостойких и коррозионностойких, диэлектрических и термостойких керамико-подобных покрытий [12-14]. Антикоррозионные свойства образцов с покрытиями изучались методами потенциодинамической поляризации (рисунок 9).

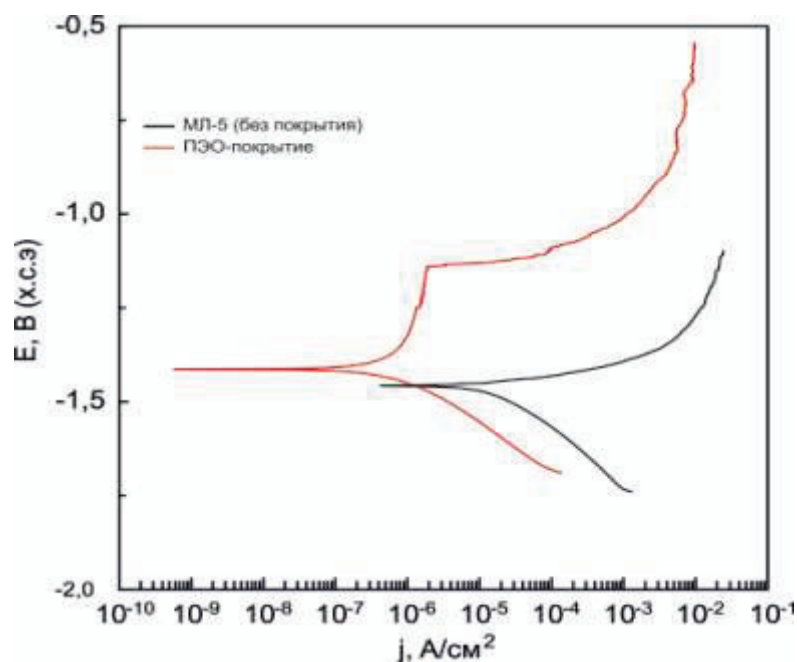


Рис. 9 – Потенциодинамические поляризационные кривые, снятые в 3%-м NaCl для сплава МЛ-5 без покрытия и сварного шва с ПЭО-покрытием

Скорость развертки потенциодинамических измерений составляла 1 мВ/с. По результатам электрохимических исследований были сделаны выводы о положительном влиянии формирования гетерооксидного ПЭО-слоя на защитные свойства изделия. Вид поляризационных кривых, представленных на рисунке 9 и значения рассчитанных из этих кривых электрохимических характеристик (таблица 5) наглядно свидетельствуют об улучшении антикоррозионных свойств образцов с покрытиями на поверхности по сравнению с необработанной поверхностью сплава МЛ-5.

Таблица 5

Электрохимические параметры образцов из магния с различными видами поверхностной обработки

Вид поверхностной обработки	$E_k$ , В, х.с.э.	$j_k$ , А см <sup>-2</sup>	$R_p$ , Ом см <sup>2</sup>
МЛ-5 без покрытия	-1,4617	$3,5 \cdot 10^{-5}$	743
ПЭО-покрытие	-1,412	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^3$

Наблюдаемое снижение токов после поверхностной обработки наплавленного материала на 2 порядка свидетельствует о значительном увеличении защитных антикоррозионных свойств поверхности магниевого сплава после ПЭО.

В настоящее время проводятся исследования в объеме НИОКР [10], направленные на повышение более качественной структуры наплавленного материала:

- 1) получение порошкового материала сферической формы;
- 2) исследование способов уменьшения градиента температуры в области взаимодействия газопорошковой смеси, сфокусированного лазерного пучка и материала основы;
- 3) исследование способов горизонтальной подачи газопорошковой смеси в ванну расплава и т.д.

Лазерная сварка изделий из алюминиевого сплава марки АК4-1Ч.

В России при изготовлении авиационной техники успешно используются упрочняемые термической обработкой высокопрочные сплавы системы AL-Cu-Mg-Fe-Ni. Они являются конструкционным материалом для силовых деталей самолетов (обшивка, силовой набор элементов фюзеляжа и крыла). На практике, перед авиационными сервисными центрами, оказывающими поддержку по системе 24/365 на глобальном уровне, не редко возникают задачи оперативного ремонтного восстановления изделий из сплава АК4-1Ч методом сварки, хотя для указанного материала сварка плавлением не рекомендуется [15, 16].

Руководством ОАО «322 АРЗ» была поставлена научно-практическая задача коллективу «Совместной отраслевой лаборатории лазерных технологий» провести экспериментальные исследования возможности выполнения технологической операции (ТО) лазерной сварки пластин изготовленных из алюминиевого сплава марки АК4-1Ч.

Исследования проведены с применением лазерного, робототехнического и вспомогательного оборудования, используемого для лазерной обработки сплава МЛ-5. Тип выполняемого лазерного сварного соединения – стыковое, без раздела кромок (без скоса кромок), двусторонне в среде инертного газа «Гелий». Защитный газ подавался коаксиально лазерному пучку, а так же снизу сварного соединения.

Информация о параметрах лазерного излучения и способах формирования защитной газовой среды представлена в таблице 6.

Таблица 6

Параметры выполнения технологической операции лазерной сварки алюминиевого сплава АК4-1Ч Т1 для пластин толщиной 4,5 ÷ 4,7 мм

Сварной шов	$P_L$ мощность лазерного излучения (Вт)	$V$ скорость перемещения лазерного пучка (мм/с)	$h$ высота от края лазерной головы до обрабатываемой поверхности (мм)	Параметры защитной среды в нижней части сварного шва Гелий		Параметры защитной среды в верхней части сварного шва Гелий	
				$P$ давление защитного газа (МПа)	Расход газа (л/мин)	$P$ давление защитного газа (МПа)	Расход газа (л/мин)
Верхний	1039	20	7	0,4	2	0,4	15
Нижний	950	20	7	0,4	2	0,4	15

Примечание:

- 1) Диаметр фокусного пятна лазерного пучка на обрабатываемой поверхности  $0,2 \pm 0,05$  мм.
- 2) Плотность мощности лазерного излучения при выполнении верхнего сварного шва  $W_1 = 14700$  Вт/мм<sup>2</sup>.
- 3) Плотность мощности лазерного излучения при выполнении нижнего сварного шва  $W_2 = 13400$  Вт/мм<sup>2</sup>.

На рисунке 10 представлен образец № 5 из алюминиевого сплава марки АК4-1Ч Т1 после выполнения технологической операции лазерной сварки с 2-х сторон.

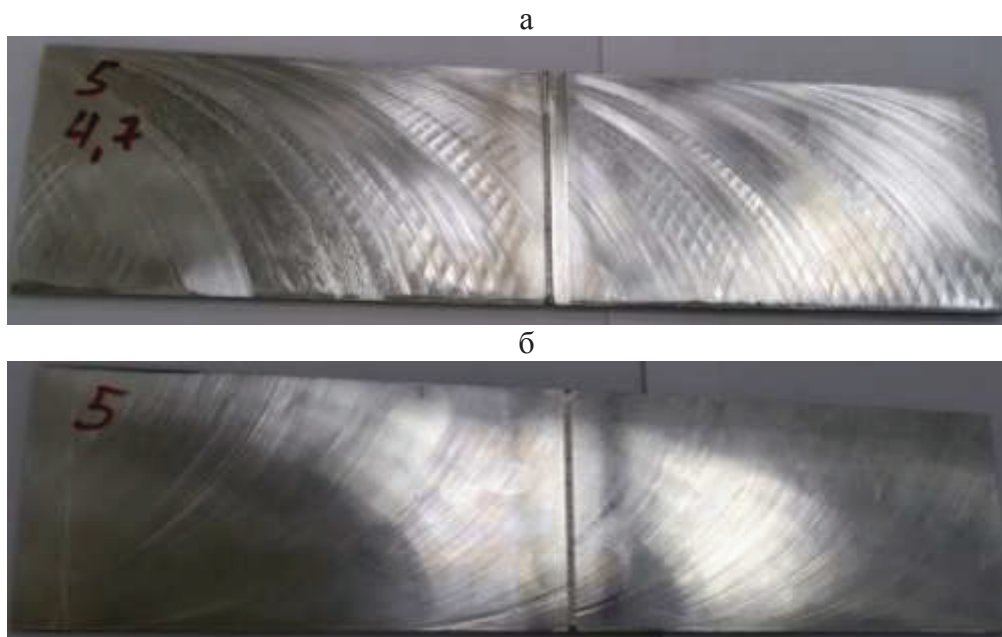


Рис. 10 – Внешний вид образца № 5 из алюминиевого сплава марки АК4-1Ч Т1 после процесса лазерной сварки с 2-х сторон:  
а – верхний сварной шов; б – нижний сварной шов

После выполнения ТО лазерной сварки производилась закалка образцов при температуре 530°C в течение 20 минут, с последующим охлаждением в воде при температуре 35÷40°C. После закалки образцы подвергались искусственному старению при температуре 200°C в течение 7 часов с последующим охлаждением на воздухе при комнатной температуре.

Результаты определения микротвёрдости сварного соединения и материала основы приведены в таблице 7.

Таблица 7

Результаты измерения микротвёрдости в сечении сварного соединения пластин из алюминиевого сплава АК4–1Ч Т1 полученного методом лазерной сварки и последующей термической обработки

№ п/п	Область исследования	Значение микротвёрдости (HV)
1	Сварное соединение	116,4
2	Сварное соединение	122,9
3	Сварное соединение	123,3
Среднее значение		120±3,2
4	Основной металл	131,5
5	Основной металл	126,0
6	Основной металл	136,0
Среднее значение		131,2



После термической обработки микротвёрдость основного материала и материала сварного шва значительно не отличаются, однако, значение микротвёрдости основного материала – алюминиевого сплава АК4–1Ч Т1, несколько выше.

После проведения термической обработки микроструктура металла в зоне сварного соединения изучалась оптическим методом с помощью металлографического микроскопа МЕТАМ ЛВ41 при увеличении 100-500 крат (рисунок 11).



Рис. 11 – Оптическое изображение микроструктуры в переходной области между материалом сварного шва (слева) и основой (справа) – алюминиевым сплавом АК4–1Ч

Как видно из рисунка, интерметаллиды сварного шва значительно меньше, чем интерметаллиды основного металла, что также является особенностью технологической операции лазерной сварки. Тем не менее, подобное различие в микроструктуре не должно повлиять на равномерность распределения механических свойств в металле.

Лазерная сварка изделий из коррозионностойкой высокопрочной стали 08X14H5M2ДЛ (ВНЛ-3).

Исследования проводились с целью определения возможности использования лазерного излучения высокой мощности для заваривания трещин в корпусах деталей сложной геометрической формы

изготовленных методом точного литья из сплава ВНЛ-3. Работы проводились в три этапа. На первом – определены режимы лазерной сварки образцов 45×25×4 мм из сплава ВНЛ-3 (таблица 8).

Таблица 8

Параметры выполнения технологической операции лазерной сварки сплава ВНЛ-3 для пластин толщиной 4,0 мм

Мощность лазерного излучения (Вт)	Скорость перемещения лазерного пучка (мм/с)	Высота от края лазерной головы до наплавляемой подложки (мм)	Параметры защитного газа (Аргон)	
			Давление защитного газа (МПа)	Расход газа (л/мин)
1000	1	10	0,35	50

На втором этапе проведены исследования механических свойств сварного шва. Результаты – положительные.

На третьем этапе – методами неразрушающего контроля (капиллярный и магнитопорошковый) выявлены дефекты корпуса неисправной детали – «кронштейн № 81.0318.1001.900 навески ООШ» (рисунок 12).



Рис. 12 – Внешний вид кронштейна № 81.0318.1001.900 навески ООШ

С учетом результатов, полученных в ходе исследований процесса лазерной сварки сплава ВНЛ-3, на завершающем этапе выполнена заварка трещины в корпусе кронштейна навески ООШ.

Результаты исследований, представленные в разделе «Лазерная сварка изделий из алюминиевого сплава марки АК4-1Ч», выполнены при финансовой поддержке программы «Дальний Восток» 2018–2020 номер проекта № 18-5-005. Результаты исследований, представленные в разделе «Лазерная сварка конструкций из магниевого сплава МЛ5», выполнены при финансовой поддержке программы «Дальний Восток» 2018–2020 номер проекта № 18-5-055.

### **Выводы**

Научно-практическая деятельность авиаремонтного предприятия ОАО «322 АРЗ» организованная совместно с ИАПУ ДВО РАН и ИХ ДВО РАН использующих результаты, полученные в рамках проводимых фундаментальных исследований, показала, что в процессах оперативного восстановления деталей авиационной техники ранее не подлежащих ремонту целесообразно использовать прогрессивные технологии лазерной сварки алюминиевых, магниевых сплавов и высокопрочных сталей. Предложенные новые технические решения по устранению трещин и коррозионных повреждений в корпусах литых деталей сложной геометрической формы позволят повысить качество выполнения работ по восстановлению летной годности воздушных судов и могут послужить основой в формировании научно-технического задела модернизации и ускоренного технологического развития авиаремонтной отрасли Российской Федерации.

### **Литература**

1. Богданов А.В., Голубенко Ю.В. Волоконные технологические лазеры и их применение / Спб.: Издательство «Лань», 2016. 2058 с.

2. Трофимов Н.В., Леонов А.А., Дуюнова В.А., Уридия З.П. Литейные магниевые сплавы (обзор) / Труды ВИАМ. – 2016. – № 12 (48). – С. 3–12.

3. Рахманов Б.Н., Кибовский В.Т. Лазерная безопасность / Информационный бюллетень Лазерной ассоциации. – 2019. – № 21-22. – С. 1–13.

4. НПБ 105-2003. Нормы пожарной безопасности. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности" (утв. приказом МЧС РФ от 18 июня 2003 г. N 314).

5. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.

6. ГОСТ 12.1007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

7. Кульчин Ю.Н., Субботин Е.П., Никитин А.И., Пивоваров Д.С., Яцко Д.С. Применение лазеров высокой мощности для резки элементов литниково–питающей системы магниевых отливок / Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 4. – С. 25–29.

8. Зарубин В.И., Кочаров Э.А., Родкин Е.С. Технологическое пособие по лазерной сварке и резке конструкционных материалов / Военно-воздушные силы. – 1982. – Выпуск № 4839. – 31 с.

9. Договор № 02.G25.31.0116 от 14.08.2014 между Акционерным обществом «Центр судоремонта «Дальзавод» и Министерством образования и науки Российской Федерации.

10. Грант № 18-5-055 Разработка способа формирования магниевых изделий сложной формы и защиты их от коррозии и износа с использованием аддитивной технологии и плазменного электролитического оксидирования / Регистрационный номер НИОКТР АААА-А17-117112270109-6.

11. Грант № 18-5-005 Обеспечение безопасности конструкций планеров летательных аппаратов и корпусов судов за счет новых технологий производства деталей и их сборки / Регистрационный номер НИОКТР АААА-А17-117112840223-2.

12. Гнеденков С.В., Синебрюхов С.Л., Сергиенко В.И. Композиционные многофункциональные покрытия на металлах и сплавах, формируемые плазменным электролитическим окислением / Владивосток: Дальнаука. 2013. 460 с.

13. Sinebryukhov S.L., Gnedenkov A.S., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V. PEO-coating/substrate interface investigation by localised electrochemical impedance spectroscopy //Surface and Coatings Technology. 2010. V. 205. №6. P. 1697–1701.

14. Фторполимерные материалы / отв. ред. академик В.М. Бузник. – Томск: Издательство НТЛ, 2017. – 600 с.

15. Гуреева М.А., Грушко О.Е., Овчинников В.В. Свариваемые алюминиевые сплавы в конструкциях транспортных средств. / Научные публикации сотрудников ВИАМ за 2008 год (<https://www.viam.ru/public/files/2008/2008-205182.pdf> - дата обращения 16.05.2018).

16. Кишкина С.И., Фридляндер И.Н. Авиационные материалы. Т.4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы. Ч.1. Деформируемые алюминиевые сплавы и сплавы на основе бериллия. Кн. 1. / М.: ОНТИ. 1982. – 625 с.