УДК: 621.791.725

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РУЧНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ОБРАЗЦОВ**

Д.В.Антипов, Ю.А. Вашуков, Г.И. Рыжов, А.Н. Никитин

*В статье производится анализ и оценка прочностных характеристик алюминиевых образцов из материала АМцМ, полученных лазерной сваркой при различных технологических режимах. Исследуется влияние мощности излучения на прочность сварного шва.*

***Ключевые слова:*** *лазерная сварка, прочностные характеристики, сварное соединение, алюминиевые сплавы, сварка авиационных конструкций.*

Ориентация отечественных авиационных предприятий на перспективные технологии в области сварки напрямую зависит от научно-исследовательской базы. В связи с этим проведение различных экспериментов, направленных на изучение новых технологий, является базисом для совершения технологического прорыва.

Конструктивная многогранность деталей, образующая номенклатуру авиационных изделий, заставляет всерьёз задуматься о формировании новых подходов к созданию конструкций с использованием передовых производственных технологий. Одним из таких процессов является лазерная сварка.

Целью исследования являлось выявление влияния различных технологических параметров лазерной сварки на прочностные характеристики сварного шва алюминиевых сплавов авиационного назначения.

Объектом исследования являются сварные образцы из алюминиевого сплава АМцМ.

Предметом исследования являются зависимости влияния технологических параметров ручной лазерной сварки на прочностные характеристики алюминиевых образцов.

В данном эксперименте использовались алюминиевые образцы марки АМцМ.

АМц $-$ сплав, обладающий высокой пластичностью в отожженном состоянии (АМцМ) и низкой в нагартованном (АМцН), хорошо сваривается газовой, атомно-водородной и контактной сваркой, применяется для изготовления баков, бензо- и маслопроводов, горловин кронштейнов, патрубков и фланцев горловин и малонагруженных деталей.

В эксперименте для определения прочностных характеристик использовались специально подготовленные образцы, полученные из ленточных полос с геометрическими параметрами: толщина – 2 мм, ширина – 20 мм. Предварительно образцы были механически зачищены. Последующая термическая обработка сварных образцов не проводилась.

Сварочный аппарат, используемый в эксперименте, основан на теплопроводности используемого материала. Аппарат позволяет контролировать и размеры сварочной ванны, и размеры сварного шва, соответственно, при помощи регулировки таких параметров как ширина, частота и мощность лазерного пучка и импульсов. Излучатель аппарата – иттербиевый твёрдотельный. В качестве защитной среды использовался аргон. Рабочее давление – 20 л/мин.

 В таблице 1 представлены характеристики сварочного аппарата.

Таблица 1 – Характеристики сварочного аппарата

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Лазерный источник |
| Выходная мощность | 1500 Вт |
| Режимы излучения | Продолжительный, модуляция, импульсный, линейный массив. |
| Диапазон регулирования выходной мощности | 1…100% |
| Длина волны лазера  | 1075$\mp $10 нм |
| Погрешность при регулировке мощности | Менее 5% |
| Максимальная частота модуляция | 50 кГц |
| Время отклика лазера | Менее 10 мс |
| Длина волны коллимационного лазера | 650 нм |
| Выходная мощность коллимационного лазера | Менее 1 мВт |
| Лазерный вывод |
| Тип | Сварочная лазерная головка |
| Коллиматорное фокусное расстояние | 50 мм |
| Фокусное расстояние | 150 мм |
| Длина оптоволоконного кабеля | 10$\mp $0,5 м |

В руководстве по эксплуатации сварочного аппарата предусмотрены рекомендуемые параметры. В таблице 2 представлены рекомендуемые производителем параметры.

Таблица 2 $-$Рекомендуемые производителем параметры

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Лазер | Мощность излучения | 0 – 1500 Вт |
| Диаметр сердцевины оптоволокна | 50 микрон |
| Сварочная голова | Фокусное расстояние коллиматора | 50 мм |
| Фокусное расстояние фокусирующего зеркала | 150 мм |
| Основные показатели | Ширина шва | 0 – 5 мм |
| Частота колебания луча | 0 – 300 Гц |
| Толщина свариваемого материала | <3 мм для сталей< 2 мм для алюминия и меди  |
| Зазор между свариваемыми деталями  | <10 % от толщины заготовок |
| Скорость сварки  | <10 см/сек  |
|  | Рекомендуемые параметры колебания луча | 0,8 – 1,2 мм, 100 – 200 Гц |
|  | Рекомендуемое давление защитного газа  | 0,2 – 0,8 МПа |

На первом этапе эксперимента выполнялось исследование влияние мощности генерируемого лучаη на прочностные характеристики сварных соединений для материала АМцМ. Методом последовательных приближений с учётом рекомендуемых параметров и технологических соображений были подобраны оптимальные параметры для сварки алюминиевых образцов толщиной S=2 мм.

В таблице 3 представлены численные значения технологических параметров. Для повышения точности эксперимента для выбранного значения мощности использовались по 3 образца.

Таблица 3 – Технологические параметры

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № образца | Мощность луча η, % | Частота колебаний υ, Гц | Ширина колебанийL, мм |
| Материал – АМЦМ, S=2 мм |
| 1 | 65 | 150 | 3 |
| 2 |
| 3 |
| 4 | 70 |
| 5 |
| 6 |
| 7 | 75 |
| 8 |
| 9 |
| 10 | 80 |
| 11 |
| 12 |

 В таблице 4 представлены сварные образцы, полученные при разных технологических параметрах (разной мощности генерируемого луча).

Таблица 4 – Полученные сварные образцы

|  |  |
| --- | --- |
| Образцы 1-3 | Образцы 4-6 |
|  |  |
| Мощность луча η =65 %, (S=2 мм) | Мощность луча η =70 %, (S=2 мм) |
| Образцы 7-9 | Образцы 10-12 |
|  |  |
| Мощность луча η =75 %, (S=2 мм) | Мощность луча η =80 %, (S=2 мм) |

Визуальный анализ показал, что образцы являются годными для исследования их прочности на разрыв.

Следующим этапом проводилась оценка прочностных характеристик на специальной разрывной машине. Для эксперимента использовались ГОСТы 6966-66 (ИСО 4136-89, ИСО 5173-81, ИСО 5177-81), а также ГОСТ ISO 15614-11 $–$ 2016.

В таблице 5 представлены результаты определения предела прочности при растяжении $R\_{M}$. Поскольку для повышения точности эксперимента использовались по 3 образца, то для образцов каждой группы определялось среднее арифметическое значение предела прочности при растяжении $R\_{M ср}$ (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты эксперимента

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № образца | Мощность луча η, % | $R\_{M}$, МПа | $R\_{Mср}$, МПа |
| 1 | 65 | 84,7 | 84,86 |
| 2 | 79,3 |
| 3 | 89,8 |
| 4 | 70 | 97,3 | 94,8 |
| 5 | 91,2 |
| 6 | 95,9 |
| 7 | 75 | 97,1 | 100,7 |
| 8 | 101 |
| 9 | 104 |
| 10 | 80 | 100 | 98,76 |
| 11 | 97,5 |
| 12 | 98,8 |

 Интервал мощности луча η=65..80 был выбран исходя из качества получения сварного шва для образца толщиной S=2 мм. В процессе эксперимента было установлено, что мощность луча η<65 % не позволяла сформировать прочный шов. Мощность луча более η>80% приводила к образованию таких структурных дефектов как прожоги.

 В таблице 6 представлены образцы после испытания на разрывной машине.

 По результатам испытаний строилась зависимость предела прочности $R\_{m}$ от мощности луча η (рисунок 1).



Рис 1. – Зависимость предела прочности $R\_{m}$ от мощности луча для образца из материала АМцМ толщиной S=2 мм

В результате итерационного изменения мощности излучателя удалось установить, что максимальное значение прочности сварного шва достигается при мощности 75% (1125 Вт).

**Заключение**

Таким образом, в ходе эксперимента было исследовано влияние мощности луча на прочностные характеристики сварного шва. Экспериментально установлено, что при мощности луча η$=75\mp 2$% наблюдается наибольшее значение предела прочности при растяжении$ R\_{M}$ для материала АМцМ толщиной S=2 мм. Дальнейшее увеличение мощности более η>80% приводит к снижению прочностных характеристик сварного соединения, ведёт к образованию структурных дефектов в сварном шве – прожогов. Значение мощности луча менее η<65% не способствует формированию прочного шва ввиду малого тепловложения.

**Библиографический список**

1. Рыжов Г.И. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПРОБЛЕМ ВНЕДРЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ В СОВРЕМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ // Всероссийская научно-практическая конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ НАУК". — 2024. — С. 352-355
2. Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 665 с.
3. Смелов В.Г., Сотов А.В., Львов М.В. Особенности лазерной сварки тонких деталей авиационно-космической техники //
4. Терри ВандерВерт Перспективы лазерной сварки в Российской промышленности - обеспечение наиболее эффективного производственного процесса // Комплект: ИТО. Инструмент, Технология, Оборудование. 2013. № 3. С. 50-53
5. Дёмичев С.Ф., Рясный А.В., Усольцев А.Л. Основные способы сварки и их применение при изготовлении узлов летательных аппаратов и их двигателей: учеб. пособие. Самара: Самарский государственный аэрокосмический ун-т, 2007. 76 с.
6. Курынцев С.В., Гильмутдинов А.Х., Шиганов И.Н. Сварка расфокусированным лазерным лучом. Сварочное производство, 2016, № 2, с. 36–47.
7. Москвитин Г.В., Поляков А.Н., Биргер Е.М. Применение методов лазерной сварки в современном промышленном производстве. Сварочное производство, 2012, № 6, с. 36–47

**Информация об авторах**

 **Антипов Дмитрий Вячеславович** $–$ доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, г. Самара. E-mail: antipov.dv@ssau.ru. Область научных интересов: Повышение производительности труда и улучшения качества выпускаемой продукции, организационное развитие систем менеджмента качества, цифровизация производственных процессов, внедрение специфических требований к производственным системам.

 **Вашуков Юрий Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, г. Самара. E-mail: vashukov@ssau.ru. Область научных интересов: технология производства конструкций из композиционных материалов, диффузионная сварка.

 **Рыжов Георгий Игоревич** $–$старший лаборанты кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, г. Самара. E-mail: ryzhov.gi@ssau.ru. Область научных интересов: лазерная сварка, ассоциативно-параметрическое проектирование авиационных конструкций, производство и проектирование летательных аппаратов.

 **Никитин Александр Николаевич** – главный технический специалист компании ООО «Шёлковый путь».

**THE INFLUENCE OF THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF MANUAL LASER WELDING ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF WELDED ALUMINUM SAMPLES**

D.V.Antipov, Yu.A. Vashukov, G.I. Ryzhov, A.N. Nikitin

The article analyzes and evaluates the strength characteristics of aluminum samples made of AMcM material obtained by laser welding under various technological conditions. The effect of radiation power on the strength of the weld is investigated.

**Keywords:** laser welding, strength characteristics, welded joint, aluminum alloys, welding of aircraft structures.

**References**

1. Ryzhov G.I. ANALIZ OSNOVNYH PROBLEM VNEDRENIYA LAZERNOJ SVARKI V SOVREMENNOE PROIZVODSTVO LETATEL'NYH APPARATOV // Vserossijskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "SOVREMENNYE TENDENCII RAZVITIYA FUNDAMENTAL'NYH I PRIKLADNYH NAUK". — 2024. — S. 352-355

2. Grigor'yanc A.G. Tekhnologicheskie processy lazernoj obrabotki: ucheb. posobie dlya vuzov. M.: MGTU im. N.E. Baumana, 2006. 665 s.

3. Smelov V.G., Sotov A.V., L'vov M.V. Osobennosti lazernoj svarki tonkih detalej aviacionno-kosmicheskoj tekhniki //

4. Terri VanderVert Perspektivy lazernoj svarki v Rossijskoj promyshlennosti - obespechenie naibolee effektivnogo proizvodstvennogo processa // Komplekt: ITO. Instrument, Tekhnologiya, Oborudovanie. 2013. № 3. S. 50-53

5. Dyomichev S.F., Ryasnyj A.V., Usol'cev A.L. Osnovnye sposoby svarki i ih primenenie pri izgotovlenii uzlov leta tel'nyh apparatov i ih dvigatelej: ucheb. posobie. Samara: Samarskij gosudarstvennyj aerokosmicheskij un-t, 2007. 76 s.

6. Kuryncev S.V., Gil'mutdinov A.H., SHiganov I.N. Svarka rasfokusirovannym lazernym luchom. Svarochnoe proizvodstvo, 2016, № 2, s. 36–47.

7. Moskvitin G.V., Polyakov A.N., Birger E.M. Primenenie metodov lazernoj svarki v sovremennom promyshlennom proizvodstve. Svarochnoe proizvodstvo, 2012, № 6, s. 36–47

**About the authors**

**Antipov Dmitry Vyacheslavovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Aircraft Production and Quality Management in Mechanical Engineering, Samara. E-mail: antipov.dv@ssau.ru Research interests: Increasing labor productivity and improving the quality of products, organizational development of quality management systems, digitalization of production processes, implementation of specific requirements for production systems.

 **Yuri Аleksandrovich Vashukov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Aircraft Production and Quality Management in Mechanical Engineering, Samara. E-mail: vashukov@ssau.ru Research interests: technology of production of structures made of composite materials, diffusion welding.

 **Georgy Igorevich Ryzhov** – Senior Laboratory assistant at the Department of Aircraft Production and Quality Management in Mechanical Engineering, Samara. E-mail: ryzhov.gi@ssau.ru Research interests: laser welding, associative parametric design of aircraft structures, production and design of aircraft.

 **Nikitin Alexander Nikolaevich** is the chief technical specialist of the Silk Road LLC company.