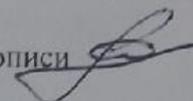


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи



Рубан Ксения Евгеньевна

**Роботизированная лазерная сварка алюминиевых конструкций
авиационного назначения**

Направление подготовки
15.04.01 – «Машиностроение»

АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

2021

Среднева
Татьяна Ивановна

Проверено

28.06.2021 Зачтено Библиотека

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольском-на-Амуре государственном университете» и в филиале ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ» им. Ю.А. Гагарина».

Научный руководитель:

Бахматов Павел Вячеславович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Технология
сварочного и металлургического
производства» ФГБОУ ВО
«Комсомольского-на-Амуре
государственного университета»

Рецензент:

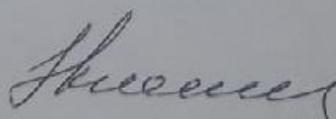
Жилин Сергей Геннадьевич,
кандидат технических наук, доцент,
и.о. заведующего лабораторией
химических и фазовых превращений
в материалах, ведущий научный
сотрудник, ИМиМ ДВО РАН, г.
Комсомольск-на-Амуре

Защита состоится «24» июня 2021 г. в 9:00 часов на заседании государственной аттестационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: Россия, 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, учебный корпус 2, аудитория 221.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <https://knastu.ru/page/1519> и на кафедре «Технология сварочного и металлургического производства» ФГБОУ ВО «КнАГУ».

Автореферат разослан 23 июня 2021 г.

Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент



О.Н. Клешина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Одной из основных задач машиностроения является снижение веса изготавливаемых конструкций и сохранение высоких механических характеристик.

В наше время развитие авиастроения сопровождается созданием новых материалов и конструкций сложной геометрической формы, обеспечивающих повышенные эксплуатационные характеристики летательных аппаратов.

Одним из самых широко распространённых в авиастроении материалов является алюминий. На ПАО «Сухой» «КнААЗ имени Ю.А. Гагарина» алюминиево-магниевые сплавы применяются при изготовлении трубопроводных систем летательных аппаратов, т. к. они обладают высокой коррозионной стойкостью, имеют средние пределы прочности и текучести, хорошо свариваются.

Актуальность темы:

Алюминиевые сплавы в зависимости от степени легирования, обладающие средними физико-механическими свойствами, находят широкое применение во многих областях промышленности. На территории ПАО компания Сухой КнААЗ в цехе № 47 производится сварка трубопроводных систем летательных аппаратов из алюминиевых сплавов.

По данным журналов РГК за период январь-май 2019 года, была составлена статистика частоты выявления дефектов представленная в таблице 1. Установлено, что процент сдачи деталей с первого предъявления не превышает 70 %, остальные 30 % подвергаются исправлению, зачастую неоднократному.

Лазерная сварка в сравнении с др. способами обладает рядом преимуществ: повышение производительности; сварка без подачи присадочного материала; малые размеры сварного соединения и зоны термического влияния; измельчение структуры сварного шва.

На территории ПАО КнААЗ лазерные сварочные технологии не применяются. Решение проблемы повышения качества сварных соединений алюминиевых элементов трубопроводных систем является актуальной задачей современного машиностроительного производства.

Цель диссертационной работы:

Проведение исследований возможности создания неразъёмных соединений из алюминиево-магниевых сплавов на роботизированном комплексе, оснащённом волоконной лазерной установкой, удовлетворяющих требованиям качества.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- разработать оснастку с жёсткой фиксацией заготовок под сварку, для исключения смещения кромок свариваемых элементов, и возможностью осуществления корневого поддува инертными газами;
- разработать устройство соосного поддува сварочной ванны с целью более эффективного отеснения газов окружающей среды от жидкого металла ванны;
- изучить влияние изменения фокусного расстояния до поверхности заготовки на особенности формирования сварной точки на поверхности металла;
- установить влияние скорости лазерной шовной сварки на образование пористости;
- изучить влияние основных параметров технологического режима лазерной сварки на структуру и механические свойства неразъёмных соединений из алюминиево-магниевых сплавов;

- исследовать влияние механической подготовки под сварку на геометрические характеристики сварных соединений.

Апробация работы:

1. Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов (Комсомольск-на-Амуре, апрель 2018 г.).

2. Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Комсомольск-на-Амуре, апрель 2019 г.).

3. Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XXI Международной научно-практической конференции: в 2-х ч. Ч. 2 (Новокузнецк, октябрь 2019 г.)

4. Научно-исследовательская работа за счёт средств ФГБОУ ВО КнАГУ (Приказ №264-0 от 01.07.2019, Комсомольск-на Амуре, июль 2019 г.).

5. Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Комсомольск-на-Амуре, апрель 2020 г.).

6. Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Комсомольск-на-Амуре, апреля 2020 г.).

7. Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 200. Springer, Cham. (Комсомольск-на-Амуре, г.)

8. Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Комсомольск-на-Амуре, апреля 2021 г.).

9. Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Комсомольск-на-Амуре, апреля 2021 г.).

Положения, выносимые на защиту:

- статистическая оценка частоты выявления дефектов при изготовлении трубопроводных систем летательных аппаратов, выполненных АрДС;

- влияние режимов шовной лазерной сварки на формирование и механические характеристики стыковых соединений;

- микроструктура сварных соединений и изменение микротвёрдости в поперечном сечении швов;

- результаты механических испытаний сварных соединений, выполненных роботизированной лазерной сваркой.

Научная новизна работы:

1. Исследована взаимосвязь между основными параметрами технологического режима лазерной шовной сварки и качеством сварного соединения. Показано, что оптимальная комбинация расхода защитного газа и режима сварки листов алюминивно-магниевого сплава заданной толщины снижает количество опасных дефектов, оказывающих влияние на прочность сварного соединения.

2. Выявлено, что при малой скорости проведения процесса лазерной сварки (до 30 мм/с) фиксируются поры как отдельные, так и цепочки, пролегающие по всей длине сварного соединения;

3. Установлено, что механическая подготовка (фрезерование) торцов стыкуемых кромок под сварку уменьшает вогнутость металла шва как с лицевой, так и с корневой части.

Практическая значимость работы:

1. Адаптация роботизированного комплекса входящего в материальную базу университета под лазерную сварку и усовершенствование приспособлений для обеспечения условий выполнения неразъёмных соединений.

2. Опытным путём установлены режимы механической подготовки стыкуемых кромок под сварку, обеспечивающие формирование сварного соединения с заданными пределами вогнутости поверхности шва.

3. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана методика проведения технологического процесса лазерной шовной сварки стыковых соединений алюминиево-магниевого сплава АМг2.

Личный вклад автора:

Заключается в совместной с научным руководителем постановке задач исследований, формулировке положений и выводов, выносимых на защиту, и написании статей по теме исследования. Автор лично производил оценку доминирующих факторов влияющих на порообразования сварных соединений, выполненных АрДС, анализировал литературные источники и проводил экспериментальные исследования с последующим анализом и обработкой полученных данных, проводил металлографические, физико-механические и другие виды исследований.

Публикации:

По материалам диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ в сборниках и трудах конференций. В базе данных Scopus представлена 1 публикация.

Объем и структура диссертации:

Диссертация состоит из введения, трёх глав, основных выводов, списка литературы, трёх приложений. Диссертация содержит 151 страниц; 59 рисунков.; 43 таблицы.; список литературы, состоящий из 51 наименований, 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы лазерной сварке алюминиево-магниевого конструкций, выполняемых роботизированной лазерной сваркой и приведена общая характеристика работы. Обоснована цель работы и задачи.

В **первой главе** дана характеристика алюминиевым сплавам, определены основные трудности, возникающие при сварке, проанализирован механизм зарождения газовых пузырьков в алюминиево-магниевого сплавах. Проанализирован зарубежный опыт лазерной сварки алюминиевого сплавов.

Анализируя зарубежный опыт лазерной сварки алюминиевого сплавов, пришли к выводу, что:

- при сварке стыковых соединений сплава 5056 (АМг5) толщиной 4 мм с круговыми колебательными движениями достигается полное проплавление пластин, исключается провисание корня шва. Изменение микротвердости в сварном соединении распределяется равномерное при круговых или поперечных колебаниях. Колебания луча незначительно влияют на прочность при растяжении, однако они являются важным фактором, определяющим пластичность сварного шва;

- обнаружено, что в соединениях сплава 6А02 (АД33) толщиной 1 мм выполненных лазерной сваркой с подачей присадочной проволоки микроструктура сварного шва со скоростью подачи проволоки 4 м/мин несколько мельче, чем со скоростью подачи проволоки 2 м/мин. Установлено, что предел кратковременной прочности и предел текучести соединений несколько выше при более высокой скорости подачи проволоки. На удлинение при разрыве влияние скорости подачи проволоки незначительное.

- в работе [26] изучена технология лазерной очистки алюминиевого сплава АМг5 толщиной 8 мм перед сваркой. Отмечено, что в процессе отслаивания оксидного слоя шероховатость поверхности увеличиваться незначительно. После достижения порогового значения мощность, примерно 20 Вт, шероховатость поверхности резко увеличивается. По результатам испытаний на статическое растяжение было установлено, что после лазерной очистки значения предела прочности выше, чем при сварке заготовок с необработанной поверхностью.

Во **второй главе** установлено на территории ПАО КнААЗ изготовление трубопроводных систем летательных аппаратов осуществляется согласно НТД, приведённой в таблице. Наиболее распространённым видом сварного соединения при изготовлении трубопроводных систем является стыковое.

Поверхность заготовок под сварку подготавливается химическим травлением.

Для сварки труб применяется автоматическая и ручная аргодуговая сварка. подбор присадочной проволоки и режимов сварки осуществляется по действующей на территории завода производственной инструкции. Сварка кольцевых швов выполняется пошаговым наложением валиков (рисунок 1).

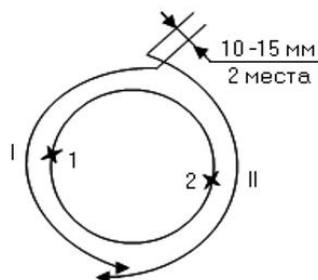


Рисунок 1 – Схема сварки кольцевых труб

На основании данных журналов рентгенографического контроля были составлены статистики частоты выявления дефектов. По данным контроля было выявлено, что дефекты встречаются в различных конструкциях, при разной толщине основного металла и протяжённости сварных швов. Наиболее часто встречающимися дефектами в сварных соединениях трубопроводов являются поры (отдельные, скопления и цепочки), непровары, трещины и вольфрамовые включения (рисунок 2).

Установлено, что именно химическая обработка, шабрение, зачистка металлическими щётками, являются причиной образования поверхностных дефектов, увеличивающих фактическую площадь свариваемых кромок, способствуют образованию пор, т. к. при расплавлении металла большее количество оксидной плёнки переносится в сварочную ванну. Пористость швов также возрастает из-за того, что сварщику приходится периодически останавливать сварку для вращения детали и осуществлять переварку части уже существующего шва, а также организацию замковых участков перекрытия формирующегося шва.

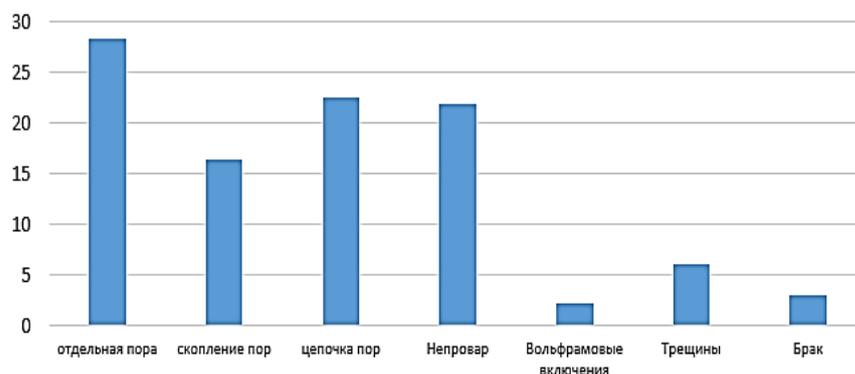


Рисунок 2 – Процентное соотношение дефектов

В третьей главе проводили ряд экспериментов, а именно:

1. Эмпирический подбор входных параметров лазерной сварки, проведение и результаты визуально-измерительного контроля (ВИК) и микроструктурных исследований. По результатам ВИК По было выявлено, что в образцах №3, 4 фиксируется непровар. В образцах №1, 2 обеспечивается полное проплавление, поверхность матовая. У образца №1 обнаружен прожог, что свидетельствует о превышении выходной мощности излучения при постоянных значениях скорости сварки и фокусном расстоянии.

Также все образцы были изучены на наличие трещин (продольных, поперечных и разветвлённых), которые являются наиболее часто встречающимися дефектами при лазерной сварке импульсного действия. По результатам ВИК наличие данного дефекта во всех сварных образцах не выявлено.

Из анализа микроструктуры образца №2 было установлено, что основной металл имеет структуру проката, т.к. зёрна вытянуты в направлении поперечного сечения образца. Структура сварного шва имеет более мелкое зерно в сравнении с основным металлом. Зона термического влияния крайне узкая. В линии сплавления фиксируется наличие столбчатых кристаллов, нормально направленных по отношению к стороне отвода тепла.

Анализ общего графика микротвёрдости поперечного сечения образца показывает, что значение микротвёрдости сварного шва значительно больше основного металла (рисунок 3).

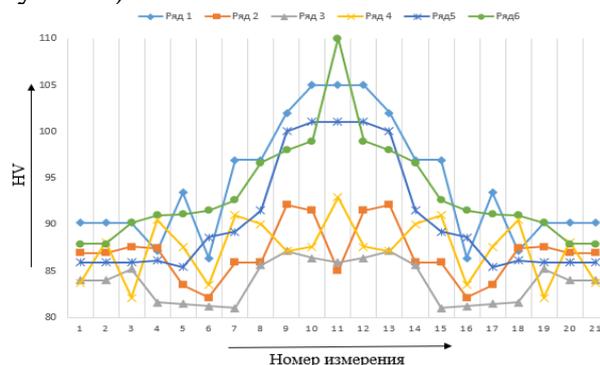


Рисунок 3 – Микроструктура образца №2

2. Статистическое моделирование дробно-факторного эксперимента и проведение капиллярной дефектоскопии и микроструктурных исследований выполненных образцов. По результатам проведённых расчётов определены следующие уравнения регрессии, позволяющие выполнять сварные соединения из

сплава АМг5 толщиной 1,5 мм с заданной геометрией шва (рисунок 4). Для проверки адекватности модели используют F-критерий Фишера. Так как по результатам расчётов критерии Фишера оказались меньше табличных значений. С доверительной вероятностью 0,95 модель можно считать адекватной.

$$y_1 = -35,043 + 0,005X_1 + 0,141X_3,$$

$$y_2 = -11,13 + 0,0024X_1 + 0,041X_3,$$

$$y_3 = -5,99 + 0,0017X_1 + 0,0011X_2 + 0,0019X_3.$$

Рисунок 4 – Уравнения регрессии

По результатам капиллярной дефектоскопии было выявлено, что во всех сварных соединениях отсутствуют поверхностные дефекты.

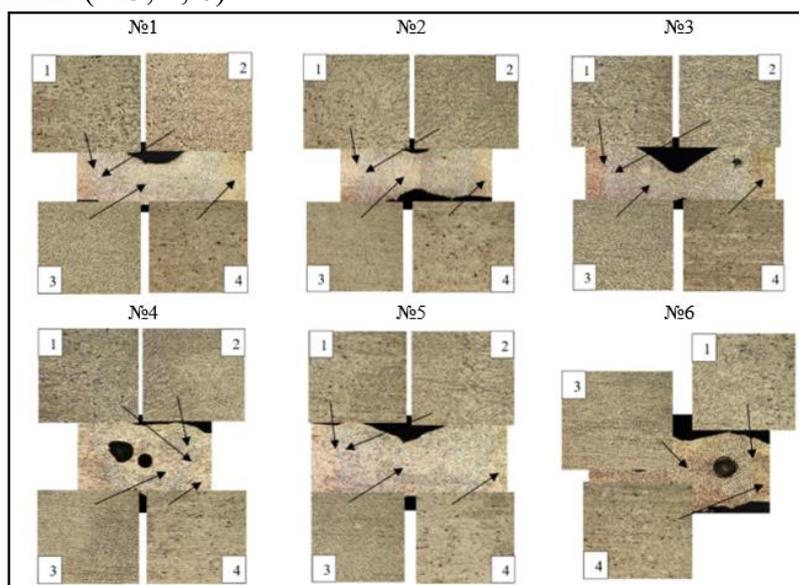
Из анализа микроструктуры (рисунок 5) было выявлено, что структура металла шва имеет более мелкое зерно в сравнении с основным металлом. Измельчение структуры в центре шва возникает вследствие высоких скоростей сварки и мощности излучения. В процессе сварки нагрев стыкуемых заготовок минимален, отвод тепла в основной металл протекает интенсивнее, вследствие чего скорость кристаллизации металла шва значительно выше, чем при аргодуговой сварке.

Оценивая геометрические характеристики сварных соединений, было установлено, что значения вогнутость как с лицевой (№1, 2, 3, 5, 6), так и с корневой (№2) поверхности швов превышают допустимые значения (ГОСТ 13919-2-2017).

Для устранения проблемы вогнутости сварных швов, предложено:

- выполнять сварные соединения с большей скоростью сварки;
- стыкуемые кромки заготовок под сварку подготавливать механической обработкой (фрезерованием торцов);
- осуществлять сварку с подачей присадочного материала.

Также при анализе микроструктуры было зафиксировано наличие пористости сварных соединений (№3, 4, 6).



1 – ЗТВ; 2 – линия сплавления; 3 – металл шва; 4 – основной металл

Рисунок 5 – Микроструктуры сварных соединений

Из анализа графиков микротвёрдости поперечных сечений образцов следует, что в сварных швах №1, 3, 4, 5 значения микротвёрдости распределяются равномерно. В образцах №2, 6 распределение микротвёрдости не равномерное, пиковые значения фиксируются в ЗТВ и металле шва.

3. Выполнения сварных точек при различных значениях фокусного расстояния и проведение фрактографии. Результаты электронной микроскопии исследуемых сварных точек представлены на рисунке 6.

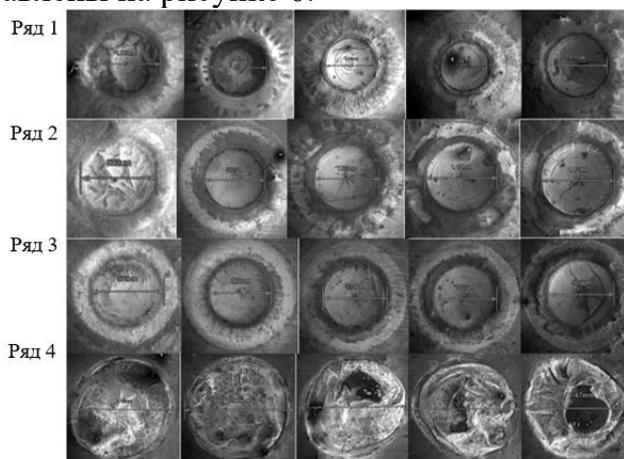


Рисунок 6 – Внешний вид сварных точек при увеличении $\times 30$

Установлено, что при увеличении расстояния до фокальной плоскости до 245 мм повышает вероятность разбрызгивания металла сварочной ванны. В этом случае поверхность точек не ровная, с многочисленными выступами, однако на поверхности отпечатков не выявляется наличие оксидной плёнки.

Поверхности точек рядов 1, 2 и 3 более ровные, гладкие, блестящие, однако во всех отпечатках фиксируется наличие разветвлённых трещин.

Точки представлены в форме небольших углублений с образованием тора вокруг.

Также по результатам электронной микроскопии установлены размеры полученных сварных отпечатков.

4. Исследование влияния варьирования скорости сварки на пористость и геометрические характеристики швов. Для обеспечения качественной защиты зоны сварки было разработано устройство соосного поддува. Полученные неразъёмные соединения контролировались ВИК, по результатам которого было установлено, что при скорости сварки от 15 до 30 мм/с наблюдается резкое снижение ширины сварного шва как с лицевой, так и с корневой поверхности соединений. При увеличении скорости сварки до 30 мм/с и более отмечается монотонное убывание ширины шва. В соединениях, полученных при скоростях сварки 50 мм/с и более, фиксируется наличие прожогов.

Анализируя микроструктуры, пришли к выводу, что выполнение процесса при скорости сварки до 25 мм/с приводит к снижению показателей вогнутости шва. В образцах №1, 2, 4, 6, 8 наблюдается смещение свариваемых кромок по высоте относительно друг друга.

Также было отмечено, что в полученных сварных соединениях повышение скорости проведения процесса сварки приводит к снижению пористости швов.

Оценивая геометрические характеристики сварных швов, можно заключить следующее:

- повышение скорости процесса лазерной сварки приводит к уменьшению размеров зоны термического влияния (ЗТВ);
- образцы выполненные при скорости сварки 35, 45, 60 мм/с (№5, 7, 9) имеют наиболее благоприятную форму поперечного сечения металла шва.

По результату проведённых микроструктурных исследований были построены графики зависимости скорость сварки на геометрические характеристики сварных швов и рассчитаны уравнения, позволяющие получать сварные соединения с заданными геометрическими размерами (рисунок 7).

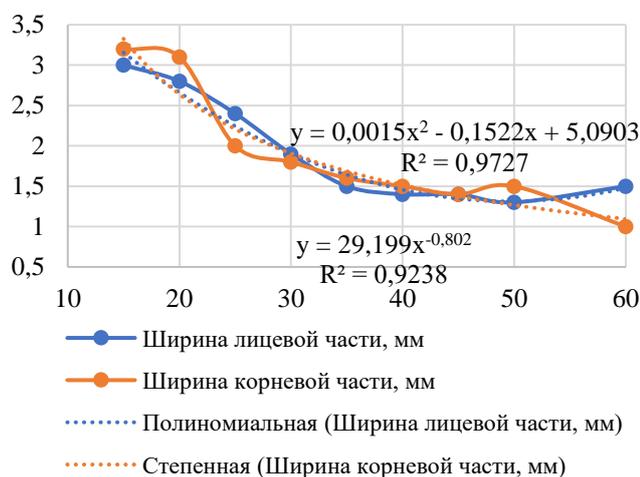


Рисунок 7 - График влияния скорости сварки на ширину сварных швов

5. Влияние заглабления фокуса на нижнюю поверхность свариваемых заготовок, подготовленных фрезерованием, на механические характеристики стыковых соединений из сплава АМг2. По результатам проведения визуально-измерительного контроля было установлено, что в сварных соединениях поверхность шва не имеет вогнутости, превышающей допуски, установленные в ГОСТ 13919-2-2017. По данным рисунка 8, видно, что диаграммы деформации сварных образцов из сплава АМг2, зависят от места выделки образца из сварного соединения и величины заглабления фокуса под поверхность заготовок. На стадии равномерной деформации близкой к сосредоточенной, разрушился образец №12. Все стадии при разрушении выдержали образцы №1, 2, 3, 4, 11, 13. Самые низкие пределы прочности фиксируются у образцов №1 и №11.

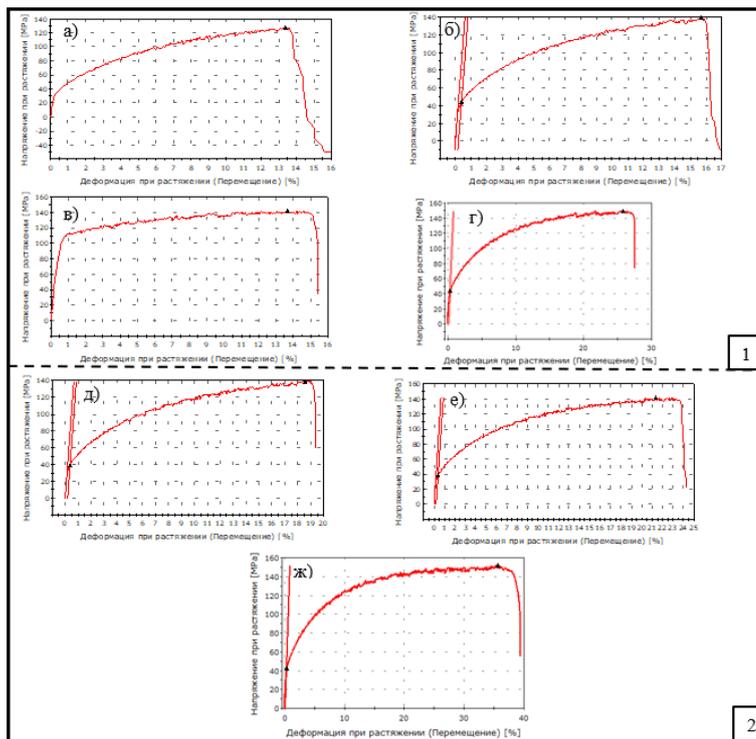
По данным испытаний на статический угол загиба было установлено, что в образце №5 образование первой трещины произошло при угле 145°, в образце №14 – при угле 110°. В обоих случаях разрушение происходило по металлу шва.

Анализируя поверхности изломов, пришли к выводу, что образцы №1, 2, 3, 11, 12 имеют неоднородный характер поверхности, образцы №4, 13 имеют волокнистый характер изломов.

По результатам исследования микроструктуры установлено, что структура сварного шва имеет зонное строение:

- центр металла шва представляет собой ячеистую структуру, состоящую из разориентированных кристаллитов и ограниченную с обеих сторон зоной перехода к основному металлу;
- переходная зона шириной 0,3...0,5 мм состоит из дендритов первого порядка.

Анализируя график распределения микротвёрдости, пришли к выводу, что значения микротвёрдости в сварном соединении распространяются равномерно, изменяются в пределах 81...89 HV.



1 – партия 1 соединение № 1; 2 – партия 2 соединение № 2
 Рисунок 8 – Диаграммы деформаций сварных образцов из сплава АМг2:
 а – образец №1; б – образец №2; в – образец №3; г – образец №4;
 д – образец №11; е – образец №12; ж – образец №13

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

По результатам статистического моделирования дробно-факторного эксперимента, рассчитана система уравнений регрессии, позволяющая определять геометрические размеры в зависимости от режимов лазерной сварки.

Исследовано влияние подготовки поверхности кромок фрезерованием и установлено влияние режимов лазерной сварки на структуру и качество сварных соединений.

По результатам проведённых исследований пришли к выводу, что сварные соединения не удовлетворяют в полной мере требованиям ПИ1.4.1555-2000. Основные дефектами сварных соединений, выполненных шовной лазерной сваркой, являются:

- занижение сечения шва (не допускается для соединений I и II категории);
- вогнутость корня шва (не допускается для соединений всех категорий);
- несоответствие геометрическим размерам сварного соединения (ширина шва должна быть не менее 6,0 мм с лицевой части, 4,0 мм – с корневой; допускается минимальное усиление шва не менее 0,8 мм с лицевой части, 0,6 мм – с корневой).

Для устранения выявленных дефектов даны рекомендации для дальнейшего проведения исследований с данной области:

- сварные соединения выполнять с подачей присадочной проволоки;

- перед процессом сварки алюминиево-магниевых заготовок производить лазерную очистку поверхности, с целью удаления оксидной плёнки;
- осуществлять лазерную сварку с наклоном луча в сторону направления сварки.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

1. Pletnev N.O., Bakhmatov P.V., Kleshnina O.N., Ruban X.E. (2021) Impact of Single Laser Pulse on Sur-face of Steel Used in Fabricated Structures. // In: Shakirova O.G., Bashkov O.V., Khusainov A.A. (eds) Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 200. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0_26 pp 245-253

2. Рубан К. Е., Бахматов П. В. Расчёт математической модели, определяющей зависимость входных параметров лазерной сварки на формирование сварных швов сплава АМг5 // Учёные записки КНАГТУ (Науки о природе и технике) - 2021 № I (51) С. 58-61

3. Рубан К. Е., Бахматов П. В. Влияние входных параметров лазерной наплавки на особенности формирования сварной точки на поверхности алюминиевого сплава // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на- Амуре, 12-16 апреля 2021 г. : в 4 частях / редкол. : Э. А. Дмитриев (отв. ред.), А. В. Космынин (зам. отв. ред.). – Комсомольск-на- Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2021. – Ч. 1. С. 143-146

4. Рубан К. Е., Бахматов П. В. Исследование влияния входных параметров лазерной сварки на характеристики сварных стыковых соединений из сплава АМГ6, АМГ2 // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на- Амуре, 12-16 апреля 2021 г. : в 4 частях / редкол. : Э. А. Дмитриев (отв. ред.), А. В. Космынин (зам. отв. ред.). – Комсомольск-на- Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2021. – Ч. 1. С.146-150

5. Вантеев М.О., Рубан К.Е., Григорьев В.В. Исследование особенности формирования сварной точки при воздействии единичным лазерным импульсом на поверхности низкоуглеродистой стали // МОЛОДЕЖЬ И НАУКА: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2020. С. 37-40.

Прочие публикации:

1. Исследование процесса автоматической размерной дуговой наплавки / Хабибов М. М., Рубан К. Е., Бахматов П. В.// Учёные записки КНАГТУ (Науки о природе и технике) - 2021 № I (51) С. 112-114.