

Н.А. Проскуряков, к.т.н., **У.С. Путилова**, к.т.н., **О.Ю. Теплоухов**, к.т.н.,
Р.А. Мамадалиев, ст. преподаватель
(Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, ул. Володарского, 38)
E-mail: mamadaliev_it@mail.ru

Особенности ручной лазерной сварки алюминиевого сплава АД33

Представлены результаты сравнительного исследования зависимости качества сварного соединения алюминиевого сплава АД33 от изменения скорости движения лазерного пучка для условий ручной и автоматической лазерной сварки. Исследована микроструктура сварного шва при ручной и автоматической лазерной сварки сплава АД33.

Ключевые слова: алюминиевый сплав; лазерное излучение; сварка; сварочная ванна; технологический процесс; микроструктура.

N.A. Proskuryakov, Can. Sc. Tech., **U.S. Putilova**, Can. Sc. Tech., **O.Yu. Teploukhov**, Can. Sc. Tech.,
R.A. Mamadaliev, Senior lecturer
(Tyumen Industrial University, 38, Volodarsky Str., Tyumen)

Peculiarities of AD33 aluminum alloy hand laser welding

The comparative investigation results of AD33 aluminum alloy welded joint quality dependence upon changes in a laser beam motion rate for conditions of hand and automatic laser welding are shown. A micro-structure of a welded joint at the hand and automatic laser welding of the AD33 alloy is investigated.

Keywords: aluminum alloy; laser emission; welding; molten pool; engineering process; micro-structure.

По мере расширения объема производства сварных конструкций алюминиевые сплавы различных классов находят все более широкое применение [1]. Алюминиевый деформируемый сплав марки АД33 (аналог сплава 6061) системы Al-Mg-Si широко применяется в промышленности благодаря своим высоким физико-химическим свойствам. Удельная прочность, пластичность, возможность термического упрочнения, коррозионная стойкость и хорошая свариваемость делают сплав АД33 незаменимым конструкционным материалом в легкой, автомобильной промышленности, в авиа- и судостроении, в гражданском строительстве.

Отличительной особенностью сварки алюминиевых сплавов является пороговый характер начала плавления. Этот эффект объясняется сочетанием таких факторов, как высокий коэффициент отражения, высокая теплопроводность и высокая теплоемкость алюминия, наличие поверхностной оксидной пленки с высокой температурой плавления [2].

Поэтому для сваривания алюминия требуются энергетические потоки с высокой плотностью. Обеспечение таких потоков в традиционных технологиях сваривания приводит к перегреву заготовок и их температурным деформациям. Поскольку коэффициент тепловой деформации алюминия, и, следовательно, укорочение сварных швов примерно в три раза больше, чем у стали, то искажения размеров и формы сварной конструкции отрицательно сказываются на прочностных характеристиках сварных изделий.

Кроме того, в результате перегрева происходит изменение молекулярной структуры шва и околошовной области, приводящее к ухудшению работоспособности сварных конструкций, снижению их эксплуатационной надежности. Изменение структуры металла в зоне термического влияния сказывается и на его коррозионной стойкости.

Анализ существующих методов сварки плавлением с точки зрения термического влияния на свариваемый материал показывает,

что наименьшим термическим влиянием обладают электронно-лучевая сварка (ЭЛС) в вакууме и лазерная сварка (наименьшая площадь и структурные изменения зоны термического влияния). Однако для ЭЛС в вакууме требуется вакуумная камера, что неприемлемо для случаев сварки габаритных объемных конструкций [1].

Метод лазерной сварки обладает важными преимуществами, по сравнению с большинством других способов сварки [3]: высокая плотность мощности лазерного излучения; кратковременность и локальность лазерного воздействия. Это позволяет сваривать детали малой толщины при незначительном термическом воздействии на соседние участки.

Однако локальность лазерного воздействия предопределяет необходимость высокой точности сборки свариваемой конструкции и малые зазоры сварочного шва.

Качество сварных соединений напрямую зависит от постоянства режимов технологического процесса. Применительно к лазерной сварке – это, в первую очередь, постоянная длительность воздействия лазерного излучения на поверхности заготовки [2].

Основной объем наиболее ответственных сварных конструкций в производстве выполняется с использованием автоматического технологического оборудования, которое позволяет обеспечить постоянную скорость движения лазерного пучка, а значит и постоянную длительность воздействия лазерного излучения на поверхности заготовки.

В опытном производстве при использовании сложных и нестандартных сварочных процессов, в единичном и мелкосерийном производстве при выполнении крупногабаритных корпусных изделий и конструкций сложной формы с труднодоступными швами установки ручной лазерной сварки в настоящее время не имеют альтернативы и достаточно востребованы.

Отличительной особенностью процесса ручной лазерной сварки является проблема обеспечения постоянства длительности воздействия лазерного излучения на поверхность заготовки при изменении скорости движения лазерного пучка [3]. Известно, что длительность воздействия лазерного излучения определяет температуру нагреваемой поверхности, темп нагревания и охлаждения, величину температурных градиентов и размеры прогретых слоев в материале.

При использовании импульсных лазеров длительность воздействия лазерного излучения на поверхность заготовки определяется длительностью импульса излучения τ . Длительность импульса излучения лазера и ско-

рость перемещения v лазерного пучка по поверхности материала связаны соотношением [4]:

$$\tau = \frac{2r_0}{v}, \quad (1)$$

где r_0 – радиус лазерного пучка на поверхности материала.

При импульсном воздействии лазерного излучения на металлы температура поверхности определяется следующим выражением [3]:

$$T = \frac{2q_0 A \sqrt{\alpha \tau}}{k \sqrt{\pi}} + T_H, \quad (2)$$

где $A=1-R$ – поглощательная способность материала; R – коэффициент отражения материала; q_0 – плотность мощности излучения; k – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент температуропроводности; T_H – начальная температура поверхности металла.

Уравнение (2) описывает связь максимальной температуры нагрева материала с параметрами лазерного излучения и опико-физическими характеристиками материала.

Для определения взаимосвязи температуры поверхности заготовки T и скорости движения лазерного пучка необходимо привести уравнение (2) с учетом выражения (1) к следующему виду:

$$T = \frac{2q_0 A \sqrt{\frac{2\alpha r_0}{v}}}{k \sqrt{\pi}} + T_H. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что даже небольшие изменения скорости движения лазерного пучка приводят к значительным изменениям скорости нагрева поверхности металла, что обуславливает нестабильность и невоспроизводимость процесса сварки.

С целью экспериментальной проверки этого положения проведено сравнительное исследование зависимости качества сварного соединения алюминиевого сплава АД33 от изменения скорости движения лазерного пучка для условий ручной и автоматической лазерной сварки.

При проведении экспериментов использовали установку ручной лазерной сварки Sekirus P0313M-SVR. Мощность оптоволоконного Nd:YAG-лазера составляет 1 кВт. Длина волны 1,06 мкм. Тип излучения непрерывный/модулируемый.

Для проведения лазерной сварки в автоматическом режиме использовалась портальная установка с ЧПУ с дискретностью линейного перемещения 0,01 мм. При этом портативная головка ручной лазерной сварки жестко закреплялась на суппорте автоматической установки (рис. 1, а).

Практика показывает, что существенное различие в результатах сварки может наблюдаться при получении стыковых соединений,

поэтому при проведении экспериментов исследовалось стыковое сварочное соединение образцов пластин сплава АД33 размером $1,5 \times 50 \times 300$ мм как в ручном (рис. 1, б), так и автоматическом режиме сварки (рис. 1, в).

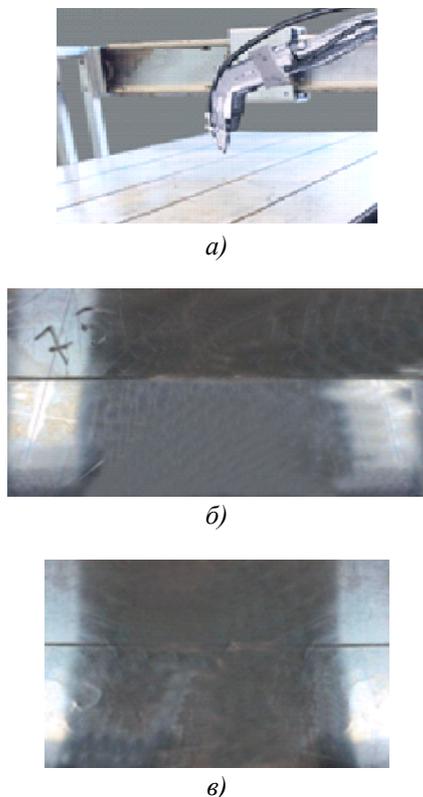


Рис. 1. Исследование зависимости качества сварного соединения: портальная установка с ЧПУ (а); образец сварного соединения сплава АД33, выполненный в режиме ручной лазерной сварки (б); образец сварного соединения сплава АД33, выполненный в режиме автоматической лазерной сварки (в)

На сторонах пластин, подлежащих сварке, выполнялась операция торцевого фрезерования с параметром шероховатости поверхности Ra 12,5 мкм и снималась фаска. Непосредственно перед сваркой осуществлялась промывка и зачистка соединяемых поверхностей. Максимальная величина зазора между пластинами, предварительно собранными встык на прихватках, не превышала 0,1 мм.

Измерение геометрических размеров и исследование макро- и микроструктур проводились с применением видеоизмерительного микроскопа «BM-150» и программно-вычислительного комплекса ProfVision на шлифах. Подготовка шлифов осуществлялась по стандартной методике: шлифовка, многократная полировка и травление. Исследование микроструктуры проводилось на оптическом микроскопе «МЕТАМ ЛВ-41» при различных увеличениях.

Назначение рациональных параметров тех-

нологического режима лазерной сварки обеспечивает требуемое качество сварного соединения. Параметры технологического режима были установлены исходя из параметров для типичных случаев лазерной сварки листа алюминиевого сплава толщиной 1,0...1,5 мм: диаметр лазерного пучка $d_0 = 0,3$ мм; скорость сварки 2,5 м/мин; расход аргона 0,7...0,9 л/с; тип излучения: импульсный. При этом, исходя из соотношения (1), длительность импульсного излучения $\tau \geq 7 \cdot 10^{-3}$ с.

Плотность мощности лазерного излучения при сварке алюминия импульсным воздействием определяется из выражения (2):

$$q_0 = \frac{(T - T_H)k\sqrt{\pi}}{2(1 - R)\sqrt{\alpha\tau}} \geq 7,5 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2,$$

где для алюминия: коэффициент отражения материала $R = 0,93$; коэффициент теплопроводности $k = 233$; коэффициент температуропроводности $\alpha = 0,094$; конечная температура поверхности металла $T = T_{пл} = 660$ °С; начальная температура поверхности металла $T_H \approx 18...20$ °С.

Установка ручной лазерной сварки Sekirus P0313M-SVR позволяет обеспечивать требуемые параметры режима лазерной сварки: $d_0 = 0,3$ мм; $\tau \geq 7 \cdot 10^{-3}$ с; $q_0 \approx 7,5$ Вт/см².

Исследование макроструктуры стыковых сварных соединений образцов пластин сплава АД33 показало, что назначенные режимы сварки обеспечивают сквозное проплавление материала, при этом как для автоматического, так и для ручного способа сварки шов в целом имеет равноосную структуру, на всех образцах зона термического влияния не превышает границы валика сварного шва.

Ширина формируемого сварного шва для условий автоматической лазерной сварки образцов в среднем составляет $\sim 1,25...1,6$ мм (рис. 2), для ручной лазерной сварки $\sim 1,1...2$ мм (рис. 3).

В ходе проведения исследований макроструктуры стыковых сварных соединений, выполненных как автоматической, так и ручной лазерной сваркой были выявлены немногочисленные околошовные сферические поры размером в среднем от 0,1944 до 0,0254 мм. Такие нарушения сплошности металла в основном находятся в зоне сплавления металла шва, а в некоторых случаях рассеяны и в корневой части шва.

Микроструктура металла шва и околошовной зоны сварных соединений сплава АД33 после лазерной сварки существенно отличается от характера микроструктуры поверхности основного материала (рис. 4, 5) как по фазовому составу, так и по кристаллической структуре.

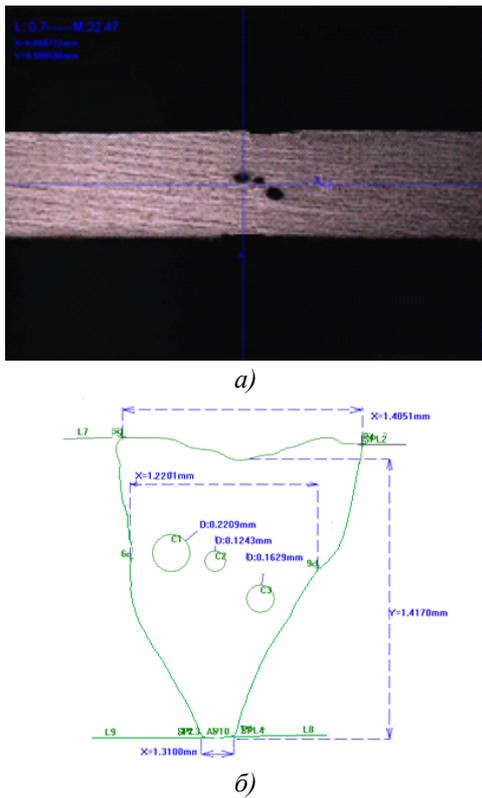


Рис. 2. Образец стыкового сварного соединения образца сплава АД33 автоматической лазерной сваркой: макроструктура $\times 50$ (а); геометрические параметры зоны термического влияния (б)

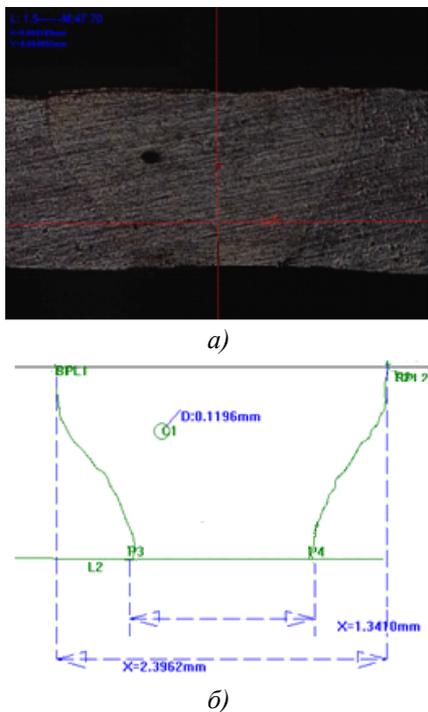


Рис. 3. Образец стыкового сварного соединения образца сплава АД33 ручной лазерной сваркой: макроструктура $\times 50$ (а); геометрические параметры зоны термического влияния (б)

Микроструктура металла шва всех образцов состоит из α -твердого раствора, на фоне

которого закристаллизовалась дендритная сетка. Общий анализ полученных микроструктур показывает, что на образцах, сваренных в автоматическом режиме (см. рис. 4) литой металл шва имеет более мелкозернистую структуру и достаточно тонкое ячеистое разветвленное дендритное строение. При этом отмечено, что сварной шов плохо поддается травлению. Очевидно это связано с наличием (повышенным содержанием) легирующих элементов.

На некоторых образцах, сваренных в ручном режиме (см. рис. 5), центральная часть микроструктуры состоит из дендритов более крупного строения, размер зерна в нем составляет 30...50 мкм, к периферии металл шва становится еще более неоднородным. Наиболее неоднородная структура формируется в корне шва.

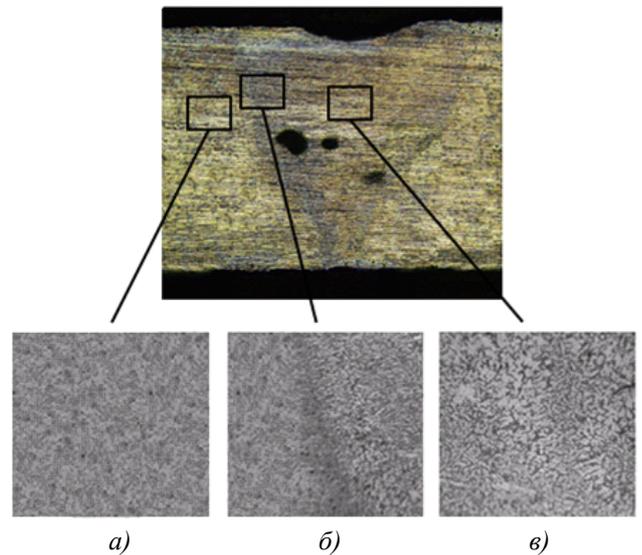


Рис. 4. Структура стыкового сварного соединения образца сплава АД33 при автоматической лазерной сварке: микроструктура основного металла (а), околошовной зоны (б) и шва (в) ($\times 150$)

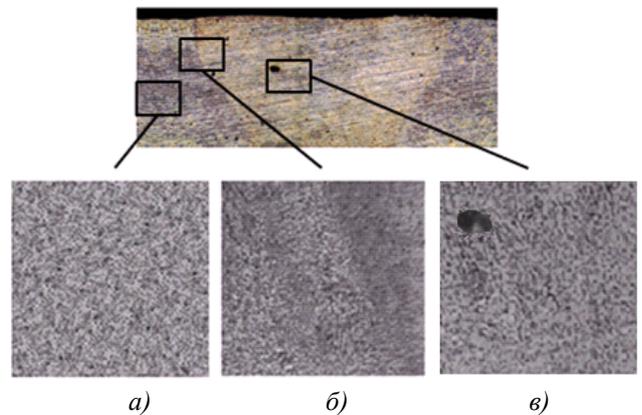


Рис. 5. Структура стыкового сварного соединения образца сплава АД33 при ручной лазерной сварке: микроструктура основного металла (а), околошовной зоны (б) и шва (в) ($\times 150$)

Неоднородная структура, также состоящая из крупных дендритов и постепенно переходящая в волокнистую структуру основного металла, наблюдается и вблизи зоны сплавления. При этом размер зоны сплавления металла шва с основным нерасплавленным металлом составляет не более 70...120 мкм.

Расчеты величины площади зоны термического влияния, выполненные на основании результатов металлографического исследования образцов сплава АД33 в ручном и автоматическом режиме лазерной сварки, представлены в табл. 1. Как видно из табл. 1, диапазон изменения величины площади зоны термического влияния для режима ручной лазерной сварки значительно больше, чем для режима автоматической лазерной сварки.

1. Результаты расчета величины площади зоны термического влияния образцов сплава АД33, выполненных в ручном и автоматическом режиме лазерной сварки

№ образца	Площадь ЗТВ, мм ² , ручной режим сварки	№ образца	Площадь ЗТВ, мм ² , автоматический режим сварки
1	1,8304	6	1,5230
2	2,2056	7	1,4062
3	2,0015	8	1,5548
4	1,1052	9	1,6875
5	1,6205	10	1,6017

Заключение

Металлографические исследования образцов сплава АД33, выполненных в ручном и автоматическом режиме лазерной сварки, показывают, что сварка в автоматическом режиме обеспечивает минимальную зону разупрочнения сварочного соединения, по сравнению с ручным режимом сварки.

Экспериментальные исследования показали, что при прочих равных условиях (одинаковом коэффициенте отражения, одинаковых технологических режимах сварки, одинаковых зазорах и сколах свариваемых кромок) более

лучшие возможности для повышения качества сварного соединения дает процесс автоматической лазерной сварки.

При лазерной сварке в ручном режиме наблюдается увеличение сварочной ванны и усиление неоднородности шва, что предопределяет неблагоприятные изменения свойств металла шва и зоны термического влияния. Очевидно, что это связано с нестабильностью скорости перемещения портативной лазерной головки, поэтому, с целью повышения качества сварного соединения необходима автоматическая система, позволяющая обеспечить оперативное регулирование технологических параметров ручной лазерной сварки в зависимости от изменения скорости перемещения лазерного пучка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Металловедение** сварки алюминия и его сплавов / Рабкин Д.М., Лозовская А.В., Склабинская И.Е.; Отв. ред. В.Н. Замков: АН Украины. Ин-т электросварки им. Е.О. Патона. – Киев: Наук, думка, 1992. –160 с.
2. **Справочник** по алюминиевым сплавам / Под ред. В.И. Елагина. – М.: Всесоюзный институт легких сплавов, 1978. – 132. с.
3. **Игнатов, А.Г., Козлов, А.В., Скрипченко, А.И.** и др. Лазерное технологическое оборудование для обработки материалов. – Л.: ЦНИИ РУМБ. 1988, – 118 с.
4. **Вейко, В.П., Шахно, Е.А.** Лазерные технологии в задачах и примерах: учеб. пособ. – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 88 с.

REFERENCES

1. *Metal Science of Welding of Aluminum and Its Alloys* / Rabkin D.M., Lozovskaya A.V., Sklabinskaya I.E.; the executive editor: V.N. Zamkov: AS of the Ukraine, Paton Institute of Electric Welding. – Kiev: Scientific Thought, 1992. – pp. 160.
2. *Reference Book on Aluminum Alloys* / under the editorship of V.I. Yelagin. – M.: All-Union Institute of Light Alloys, 1978. – pp. 132.
3. Ignatov, A.G., Kozlov, A.V., Skripchenko, A.I. et al. *Laser Technological Equipment for Material Processing*. – L.: CRI RUMB. 1988, - pp. 118.
4. Veiko, V.P., Shakhno, E.A. *Laser Technologies in Problems and Examples: manual*. – S-Pb: University ITMO, 2014. – pp. 88.

Рецензент д.т.н. В.В. Овчинников