

**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  $\tau$ . 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;  $\alpha$  – 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.

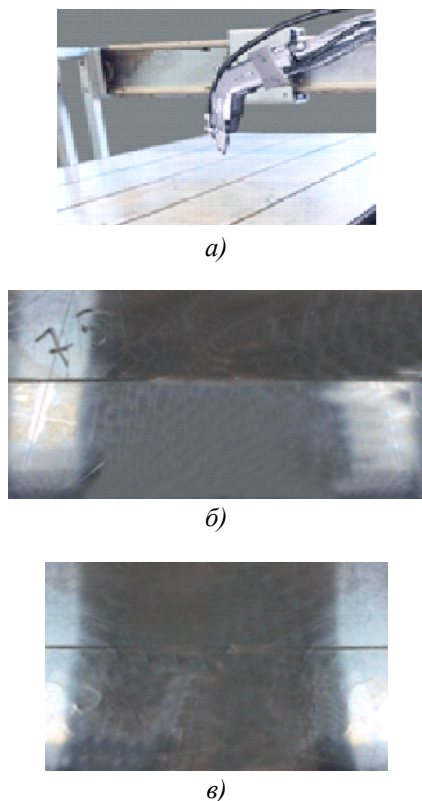
С целью экспериментальной проверки этого положения проведено сравнительное исследование зависимости качества сварного соединения алюминиевого сплава АД33 от изменения скорости движения лазерного пучка для условий ручной и автоматической лазерной сварки.

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/см<sup>2</sup>.

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.

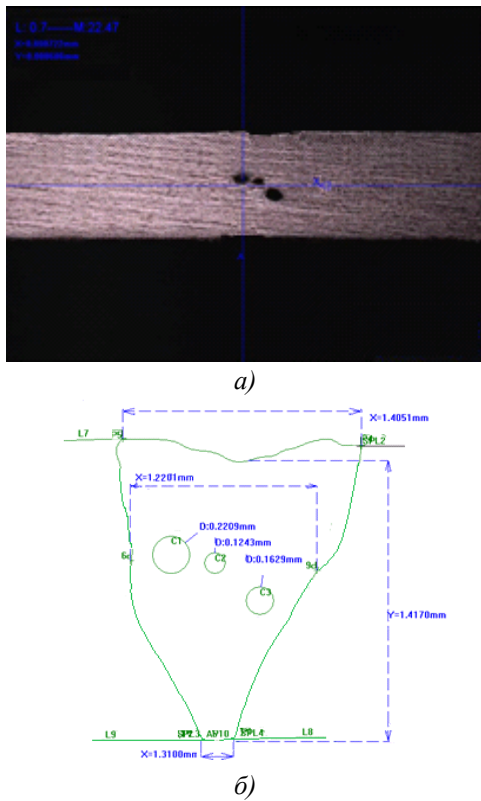


Рис. 2. Образец стыкового сварного соединения образца сплава АД33 автоматической лазерной сваркой: макроструктура  $\times 50$  (а); геометрические параметры зоны термического влияния (б)

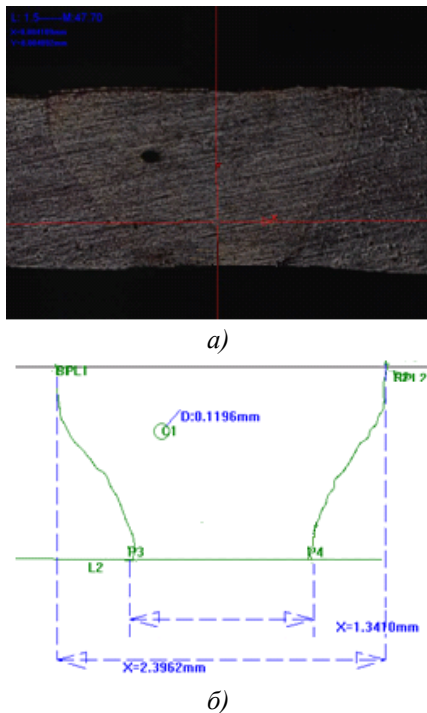


Рис. 3. Образец стыкового сварного соединения образца сплава АД33 ручной лазерной сваркой: макроструктура  $\times 50$  (а); геометрические параметры зоны термического влияния (б)

Микроструктура металла шва всех образцов состоит из  $\alpha$ -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.

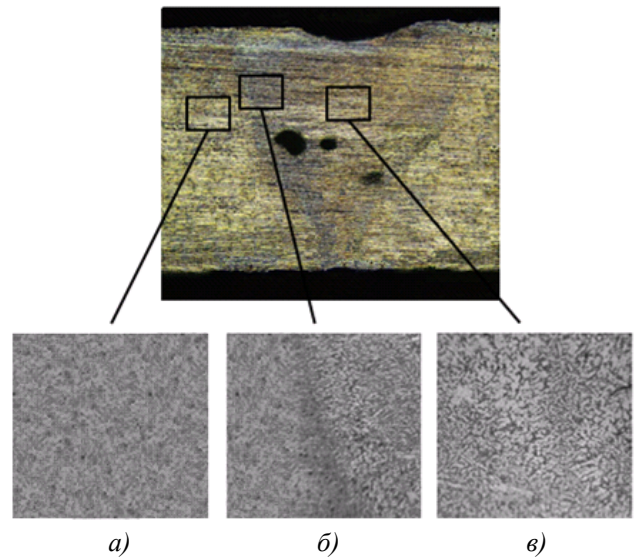


Рис. 4. Структура стыкового сварного соединения образца сплава АД33 при автоматической лазерной сварке: микроструктура основного металла (а), околошовной зоны (б) и шва (в) ( $\times 150$ )

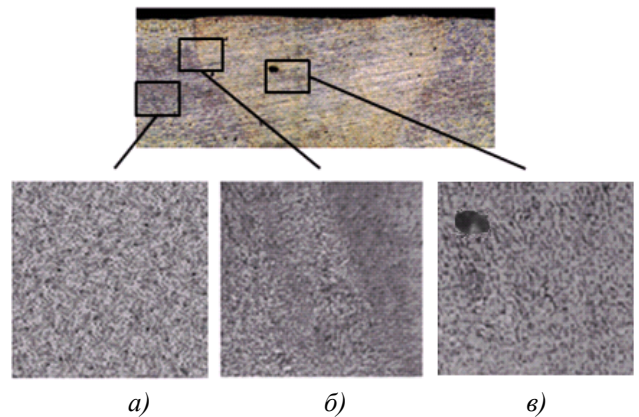


Рис. 5. Структура стыкового сварного соединения образца сплава АД33 при ручной лазерной сварке: микроструктура основного металла (а), околошовной зоны (б) и шва (в) ( $\times 150$ )

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 <sup>2</sup> , ручной режим сварки	№ образца	Площадь ЗТВ, мм <sup>2</sup> , 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*