

## ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Чл.-кор. НАН Украины **И. В. КРИВЦУН**, **В. Д. ШЕЛЯГИН**, **В. Ю. ХАСКИН**, кандидаты техн. наук,  
**В. Ф. ШУЛЫМ**, **Е. Г. ТЕРНОВОЙ**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы технологические возможности гибридной лазерно-плазменной сварки алюминиевых сплавов в сопоставлении с плазменной и лазерной сваркой. Изучены свойства сварных соединений, выполненных гибридным способом, а также их макро- и микроструктура. Показана перспективность применения лазерно-плазменной сварки тонколистовых алюминиевых сплавов при использовании лазеров с остророфокусированным пятном излучения.

*Ключевые слова:* гибридная лазерно-плазменная сварка, алюминиевые сплавы, лазерное излучение, диодный лазер, CO<sub>2</sub>-лазер, присадочная проволока, очистка, разнополярные импульсы, синергетический эффект, механические свойства, металлографические исследования, структура

В промышленности часто возникает необходимость сварки изделий из алюминиевых сплавов, что служит стимулом для разработки соответствующей технологии. Актуальны такие задачи, как сварка тонкостенных сотовых и стрингерных панелей вагонов высокоскоростной железной дороги, корпусных элементов авиационной техники, судовых конструкций, профильных проставок для стеклопакетов, облегченных корпусов автомобилей и т. д. [1]. Для создания сварных конструкций из тонколистовых алюминиевых сплавов можно использовать различные технологии. В последнее время вызывают интерес технологии, в которых применяется лазерное излучение [1–6]. Большинство авторов признает перспективность лазерной сварки, однако при этом они отмечают ряд проблем, связанных с ней.

Одной из важных проблем, возникающей при лазерной сварке алюминия и его сплавов, характеризующихся высокой отражательной способностью свариваемой поверхности, является необходимость в использовании лазерного излучения большой мощности (свыше 2 кВт) для перехода от поверхностного к объемному тепловложению [2]. Однако повышение мощности лазерного излучения влечет за собой увеличение стоимости лазерного оборудования и, как следствие, рост себестоимости 1 м погонной длины сварного шва. Одним из способов решения этой проблемы является повышение поглощающей способности свариваемых поверхностей. Для этого можно использовать лазерное излучение с более короткой длиной волны, например, диодные или Nd:YAG-лазеры вместо CO<sub>2</sub>-лазеров [2]. Другим способом решения указанной проблемы является использование комбинированных [4] или гибридных ла-

зерно-дуговых [7] технологий, что позволяет сочетать преимущества отдельных составляющих способа с нивелированием их недостатков [8].

Другой существенной проблемой, возникающей при лазерной сварке алюминиевых сплавов, является устранение оксидной пленки — так называемая очистка. Обычно эту операцию выполняют механическим способом (например, шпатлеванием) или химическим травлением в водно-щелочном растворе. Немецкие ученые разработали способ лазерной очистки свариваемых деталей от оксидной пленки [9]. Для этого они использовали специальную фокусирующую оптику, расщепляющую лазерный пучок на два — слабый очищающий и более мощный сварочный. Возможно также применение специальных лазерных установок, предназначенных для очистки соединяемой поверхности, что приводит к дополнительным затратам.

Нами исследован способ гибридной лазерно-плазменной сварки алюминиевых сплавов с одновременной очисткой их поверхности путем использования разнополярных импульсов сварочного тока. В качестве лазерной составляющей гибридного процесса сварки использован диодный лазер модели DF 020 HQ (фирма «Рофин-Синар», Германия) мощностью до 2 кВт с длиной волны 0,808/0,940 мкм и CO<sub>2</sub>-лазер ЛТ 104 [10] с длиной волны 10,6 мкм. Для практической реализации процесса гибридной сварки с учетом результатов ранее проведенных исследований [11] разработан и изготовлен специальный интегрированный плазмотрон, в котором лазерное излучение воздействовало на свариваемую деталь вместе с плазмой прямого действия через общее сопло. В связи с тем, что плазмотрон использовали вместе с диодным лазером, фокусирующая оптика которого имеет фиксированное фокусное расстояние 120 мм, при разработке его конструкции не удалось реализовать схему соосного воздействия лазерного пучка и дуги на сварочную ванну.

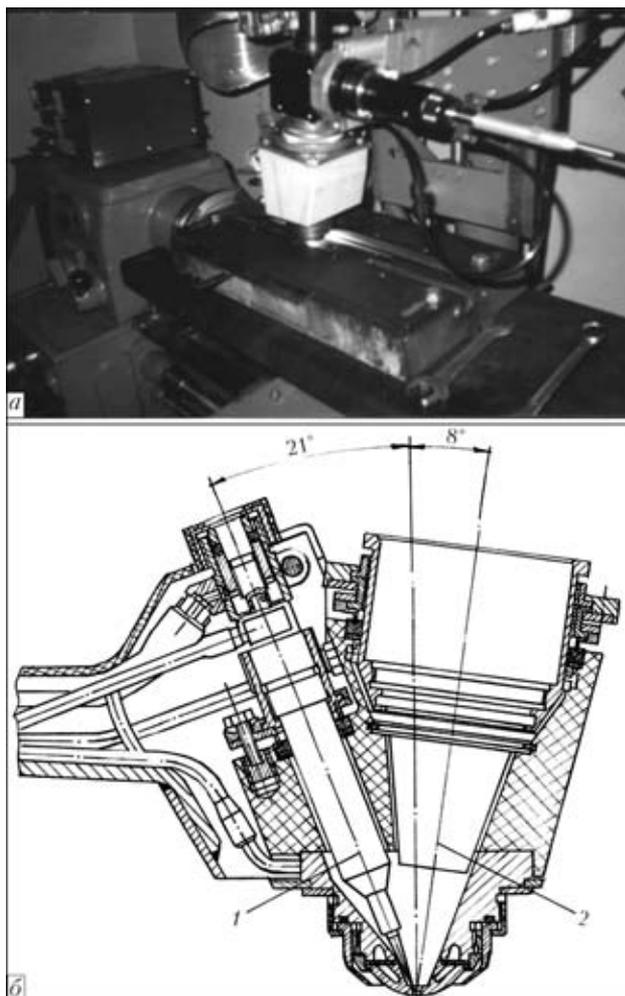


Рис. 1. Внешний вид (а) и поперечное сечение (б) интегрированного плазматрона для гибридной лазерно-плазменной сварки: 1 — катодный узел; 2 — ось сфокусированного лазерного пучка

Была принята схема, при которой оси электрода плазматрона и лазерного пучка располагались под минимально возможными углами к оси плазмообразующего сопла (соответственно 21 и 8°). Внешний вид и схема плазматрона в разрезе представлены на рис. 1. Устройство представляет собой одноэлектродный плазматрон со сменным (вместе с цангой) вольфрамовым электродом диаметром 2,5...3,5 мм, установленным в водоохлаждаемом корпусе. Электрод может перемещаться вдоль своей оси с последующей фиксацией, его движение регулируется также в поперечном направлении. Благодаря специальной форме медного сопла и наличию в нем водяного канала охлаждающую воду можно подвести непосредственно к выходному каналу диаметром 1,5...3,0 мм, создавая таким образом максимально благоприятные условия для его охлаждения. Конструкция плазматрона позволяет вводить сфокусированный лазерный пучок в зону сварки под углом 8° к оси сопла, для чего в верхней части его корпуса предусмотрен специальный узел для

подсоединения к нему фокусирующей системы диодного лазера DF 020 HQ с оптическим волноком. Предусмотрена возможность регулировки положения фокусного пятна как относительно оси лазерного пучка, так и стенок выходного канала сопла. Для предотвращения загрязнения фокусирующей оптики используется защитное стекло с принудительным обдувом его плазмообразующим газом, а для защиты изготовленного из капролона внешнего корпуса плазматрона от возможного попадания на него лазерного излучения имеется конус из нержавеющей стали.

Для питания плазматрона разработан и изготовлен источник питания плазменной дуги, позволяющий осуществлять сварку на прямой полярности и в режиме разнополярных импульсов тока. Используемые при его создании решения схем (высокие частота открывания и закрывания ключей, а также частота преобразования импульсов тока) позволили обеспечить необходимые динамические характеристики и широкий диапазон регулирования длительности технологических импульсов (0,1...99,0 мс). В сочетании со сварочным током до 110 (прямой) и до 60 А (обратной полярности) это позволило обеспечить широкие технологические возможности комплекса плазматрон-источник питания.

При выполнении сварки диаметр сопел меняли в пределах 2,0...2,5 мм. Диапазон регулирования лазерной мощности составлял 0,8...2,0 кВт, а сварочного тока — 50...110 А при напряжении около 20 В. Частота импульсов сварочного тока достигала 1000 Гц. В качестве материалов свариваемых образцов использовали сплавы АМц, АМг3, АМг5м, АМг6 толщиной 0,5...3,0 мм. В ряде случаев применяли присадочную проволоку СВАМг6 диаметром 1,2 мм.

В ходе экспериментов выполняли наплавку на плоских образцах, а также сварку стыковых и нахлесточных соединений. Процесс сварки осуществляли в аргоне с помощью лазерного излучения или плазмы прямого действия, а также гибридным способом. При этом диаметр пятна сфокусированного излучения диодного лазера составлял 1,2 мм, а СО<sub>2</sub>-лазера — 0,5 мм. Установлено, что в случае плазменного процесса для получения качественной очистки от оксидной пленки на высоких скоростях (60...330 м/ч) оптимальное соотношение длительности и амплитуды импульса тока при прямой и обратной полярности составляет приблизительно 1:1. Это соотношение использовано в дальнейшем и для гибридного процесса. Поскольку такой режим не является оптимальным с позиций срока службы и стабильности работы вольфрамового катода, предприняты меры по повышению этих параметров, одной из которых является использование в качестве анода дуги водоохлаждаемого плазмформирующего сопла.

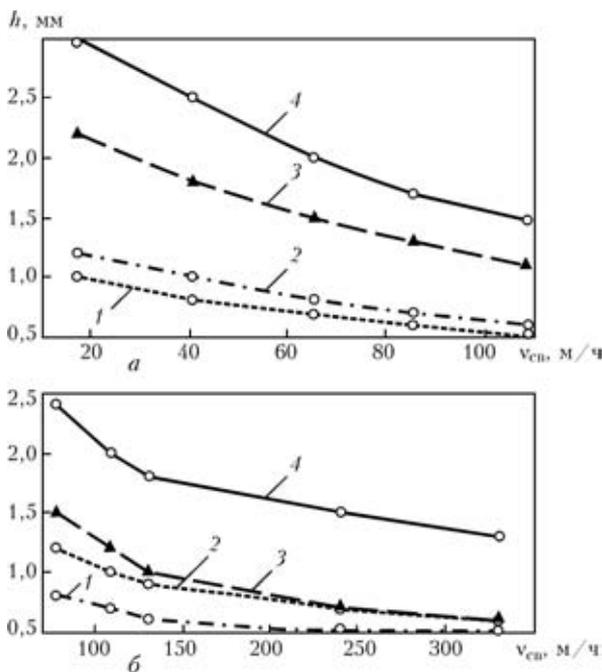


Рис. 2. Зависимости глубины проплавления  $h$  от скорости  $v_{св}$  лазерно-плазменной сварки алюминиевых сплавов с использованием излучения диодного лазера (а) и CO<sub>2</sub>-лазера (б): 1 — лазерная сварка; 2 — плазменная; 3 — лазерно-плазменная (арифметическая сумма значений  $h$ ); 4 — гибридная

В результате обработки данных, полученных при сварке лазерным излучением мощностью около 2 кВт, плазмой при токе 100 А и гибридным способом при 50%-й мощности плазменной составляющей и 1,2...1,5 кВт мощности лазерной, построены зависимости, приведенные на рис. 2. При сравнении кривых 1 на рис. 2 видно, что при лазерной сварке несмотря на больший диаметр сфокусированного пятна излучения диодного лазера меньшая длина волны позволяет значительно увеличить глубину проплавления. В плазменном процессе (кривые 2 на рис. 2) для всего диапазона скоростей наблюдается монотонное уменьшение глубины проплавления. Кривые 3 на этом рисунке представляют собой арифметическую сумму значений кривых 1 и 2. Кривые 3 и 4 свидетельствуют о наличии синергетического эффекта при одновременной сварке в общую ванну лазерной и плазменной составляющими. Причем при использо-

вании CO<sub>2</sub>-лазера этот эффект проявляется интенсивнее за счет меньшего диаметра сфокусированного пятна излучения (большей плотности мощности). Здесь следует отметить, что несмотря на больший диаметр пятна излучения диодного лазера (и соответственно меньшую плотность мощности по сравнению с CO<sub>2</sub>-лазером) меньшая длина волны излучения, а значит, и больший коэффициент поглощения поверхностью алюминия обеспечивает при одинаковой скорости гибридной сварки соизмеримую в обоих случаях глубину проплавления (кривые 4 на рис. 2). Уменьшение диаметра сфокусированного пятна повышает стабильность горения плазмы на высоких скоростях сварки и «привязывает» ее к зоне действия лазерного излучения.

Для наглядной оценки различных способов сварки алюминиевого сплава АМг3 толщиной 1,5 мм в табл. 1 представлен внешний вид швов с лицевой стороны и поперечные макрошлифы сварных стыковых соединений, полученные каждым из трех способов сварки на скорости 108 м/ч с применением диодного лазера DF 020 HQ, а в табл. 2 — внешний вид наплавов с лицевой стороны и их поперечные макрошлифы, полученные этими же способами на скорости 130 м/ч с применением CO<sub>2</sub>-лазера ЛТ 104. При этом излучение диодного лазера мощностью 1,5...2,0 кВт обеспечивало стабильное проплавление на глубину до 0,5 мм (табл. 1). Излучение CO<sub>2</sub>-лазера при аналогичных режимах оставляло на поверхности образцов лишь прерывистые следы (табл. 2). Проплавление плазменной дугой на скорости свыше 240 м/ч также носит нестабильный и прерывистый характер несмотря на высокую частоту следования импульсов сварочного тока. При гибридном способе сварки достигнуты наилучшие технологические результаты во всем исследованном диапазоне скоростей. Полное сквозное проплавление образца соединения толщиной 1,5 мм с использованием излучения CO<sub>2</sub>-лазера обеспечивалось при скорости сварки 130 м/ч и суммарной мощности лазера и плазмы 2 кВт (примерно по 1 кВт каждого). Это объясняется тем, что меньший диаметр фокусного пятна излучения CO<sub>2</sub>-ла-

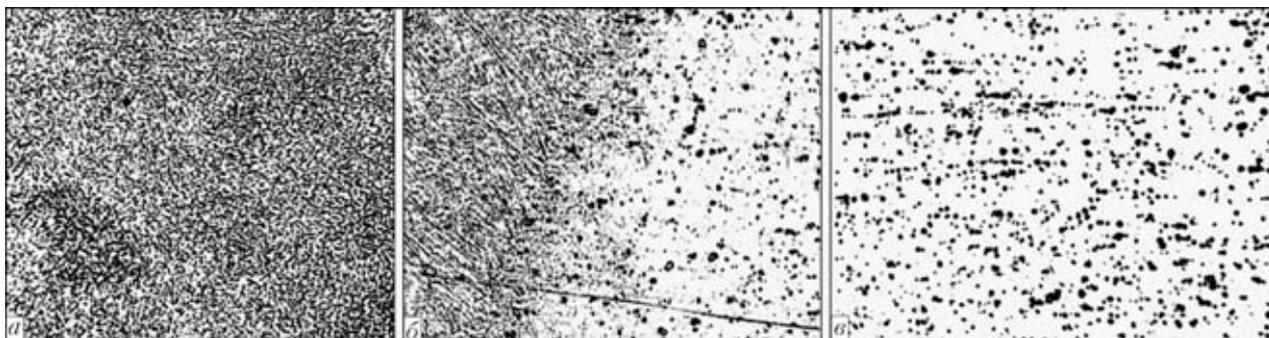


Рис. 3. Микроструктура (×150) металла сварного стыкового соединения сплава АМг3 толщиной 1,5 мм, полученного гибридным лазерно-плазменным способом: а — центральная часть шва; б — зона сплавления; в — основной металл



Таблица 1. Внешний вид и поперечные макрошлифы образцов стыковых и нахлесточных соединений сплава АМгЗ толщиной 1,5 мм, полученных лазерной, плазменной и гибридной сваркой

Мощность лазера, Вт	Ток плазменной дуги (прямая/обратная полярность), А	Внешний вид шва с лицевой стороны	Поперечный макрошлиф
2000	—		
—	100/50		
1000	50/50		
1500	100/50		

Примечание. Скорость сварки 108 м/ч; диодный лазер DF 020 HQ; диаметр сфокусированного пятна 1, 2 мм; заглупление фокуса 1 мм; напряжение на плазменной дуге 20 В.

Таблица 2. Внешний вид и поперечные макрошлифы образцов стыковых соединений сплава АМгЗ толщиной 1,5 мм, полученных лазерной, плазменной и гибридной сваркой

Мощность лазера, Вт	Ток плазменной дуги (прямая/обратная полярность), А	Внешний вид шва с лицевой стороны	Поперечный макрошлиф
1500	—		—
—	100/50		
1000	60/50		

Примечание. Скорость сварки 130 м/ч; CO<sub>2</sub>-лазер ЛТ 104; диаметр сфокусированного пятна 0,5 мм; заглупление фокуса 1 мм; напряжение на плазменной дуге 20 В.

зера позволяет обеспечить более высокую плотность энергии, чем излучение диодного лазера. В этом случае образуется узкая зона интенсивного испарения проплавляемого металла, которая улучшает условия горения плазменной дуги, способствует ее дополнительному сжатию и соответственно получению большей глубины проплавления, стабилизации процесса и «привязке» плазмы к зоне действия лазерного излучения, что подтверждено в работе [12].

Результаты исследований химических свойств сварного соединения, полученного гибридным способом сварки, приведены в табл. 3. Испытания на временное сопротивление разрыву стыковых соединений из сплава АМгЗ, полученных гибридной

сваркой с использованием диодного лазера, показали, что прочность металла шва равна 232...237 МПа (90...95 % прочности основного металла). На основании этих исследований установлено, что прочность сварных соединений, полученных лазерно-плазменным способом с использованием излучения диодного лазера, составляет примерно 0,9 прочности основного металла. Такой результат позволяет утверждать, что по прочностным характеристикам гибридная сварка превосходит дуговые способы сварки и является приемлемой для изготовления большинства конструкций.

Проведенные исследования микроструктур стыкового соединения сплава АМгЗ (рис. 3) тол-

Таблица 3. Химический состав (мас. %) сварного соединения сплава АМгЗ, полученного гибридным способом сварки с использованием диодного лазера

Объект исследования	Si	Mg	Mn	Cu	Zn	Ni	Ti	Fe	Al
Основной металл	0,38	3,5	0,5	0,1	0,18	0,03	0,1	0,4	Осн.
Шов	0,40	3,2	0,3	0,1	0,12	0,03	0,1	0,4	Осн.

щиной 1,5 мм, полученного гибридным способом сварки, свидетельствуют о том, что структура металла шва имеет дендритное мелкодисперсное строение. Выделение фаз в шве — дисперсное. Линия сплавления без признаков перегрева, за исключением корневой части шва, где наблюдаются непрерывные цепочки выделений по границам зерен в зоне термического влияния, непосредственно у линии сплавления, которые при необходимости можно удалить после сварки механическим путем.

### Выводы

1. Применение гибридной лазерно-плазменной сварки алюминиевых сплавов позволяет в 2...4 раза увеличить глубину проплавления по сравнению с лазерной сваркой и примерно во столько же повысить скорость сварки по сравнению с плазменной. При этом важным фактором является использование катодной очистки поверхности от оксидной пленки.

2. Проявление синергетического эффекта, привязка плазменной дуги к зоне действия лазерного излучения и стабильность процесса высокоскоростной гибридной сварки в большей степени связаны со степенью фокусировки лазерного излучения, чем с длиной его волны.

3. Химический состав сварных соединений близок к составу основного металла, а их временное сопротивление разрыву составляет около 0,9 прочности основного металла, что превышает свойства аналогичных соединений, полученных дуговыми способами сварки.

4. Структуры сварных соединений алюминиевых сплавов, полученные гибридным способом, имеют более мелкую дисперсность металла шва и узкую зону сплавления по сравнению с дуговыми способами сварки, что приближает их к соединениям, полученным лазерным способом.

5. Результаты предварительных исследований технологических возможностей гибридной лазерно-плазменной сварки алюминиевых сплавов позволили сделать вывод о перспективности этого способа и необходимости проведения дальнейших более глубоких экспериментальных и исследовательских работ в области скоростной сварки тонколистовых конструкций из алюминиевых сплавов.

1. Kimihiro Shibata, Takakuni Iwase, Hiroki Sakamoto, Minoru Kasukawa. Welding of aluminum car body parts with twin-spot high power Nd:YAG laser // *J. Light Met. Weld.* — 2003. — № 4. — P. 25–34.
2. Tsukamoto S. Laser welding // *Welding Intern.* — 2003. — 17, № 10. — P. 767–774.
3. Katayama S. Laser welding of aluminium alloys and dissimilar metals // *Ibid.* — 2004. — 18, № 8. — P. 618–625.
4. Volpone M., Mueller S. M. Laser e Friction Stir Welding — Due tecnologie di giunzione emergenti. Confronto su vantaggi e limitazioni // *Riv. Ital. Saldatura.* — 2005. — № 5, Sept./Oct. — P. 683–691.
5. Rathod M. J., Kutsuna M. Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding // *Welding J.* — 2004. — № 1. — P. 16–26.
6. Технологии сварки и соединений в XXI веке // *J. Jap. Welding Society.* — 2001. — 70, № 3. — P. 6–1.
7. Ishide T., Tsubota S., Watanabe M., Ueshiro K. Development of TIG-YAG and MIG-YAG hybrid welding // *Welding Intern.* — 2003. — 17, № 10. — P. 775–780.
8. Патон Б. Е. Совершенствование способов сварки — один из путей повышения качества и экономичности сварных конструкций // *Автомат. сварка.* — 1995. — № 11. — С. 3–11.
9. Laserstrahlschweißen mit prozessintegrierter Reinigung / J. von Beren, T. Seefeld, F. Vollertsen // *Der Praktiker.* — 2004. — № 4. — S. 118–120.
10. Технологический CO<sub>2</sub>-лазер ЛТ 104 мощностью 10 кВт / В. П. Гарашук, В. Д. Шелягин, О. К. Назаренко и др. // *Автомат. сварка.* — 1997. — № 1. — С. 36–39.
11. Гибридная лазерно-микроплазменная сварка металлов малых толщин / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, И. В. Кривцун и др. // Там же. — 2002. — № 3. — С. 5–9.
12. Soudage hybride arc/laser / F. Briand, K. Chouf, P. Leffbvre, O. Matile // *Soudage et Techniques Connexes.* — 2002. — № 9/10. — S. 9–13.

Technological capabilities of the hybrid laser-plasma method of welding aluminium alloys were investigated in comparison with plasma and laser welding. Properties of the welded joints made by the hybrid method, as well as their macro- and microstructure, were investigated. It is shown that practical application of laser-plasma welding holds promise for thin-sheet aluminium alloys using lasers with a sharp-focused radiation spot.

Поступила в редакцию 30.06.2006