



УДК 621.791.725:621.791.755.5

Академик НАН України **И. В. Кривцун, А. И. Бушма, В. Ю. Хаскин**

Лазерно-плазменная сварка нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов

Изучены технологические особенности и возможности гибридного лазерно-плазменного способа сварки тонколистовых алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей без применения присадочного материала, а также проведено его сравнение с плазменной и лазерной сваркой. Исследованы основные свойства сварных соединений, выполненных гибридным способом, выявлены их механические характеристики и основные структурные особенности. Показана перспективность практического применения лазерно-плазменной сварки тонколистовых алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей.

В современной промышленности алюминиевые сплавы нашли достаточно широкое применение. Примерами могут служить производство судов малого водоизмещения, самолетостроение и ракетная техника, изготовление облегченных вагонов для скоростной железной дороги, а также облегченных корпусов некоторых автомобилей [1]. Во всех перечисленных случаях используются различные по своему составу и механическим свойствам алюминиевые сплавы, а конструктивные решения зачастую связаны со сваркой, что стимулирует научные исследования в этой области.

Также существует ряд задач, решение которых связано с необходимостью сварки тонкостенных изделий из нержавеющей сталей: изготовление сильфонных компенсаторов для атомной энергетики, химической и пищевой промышленности, изготовление такого оборудования, как емкости холодильных установок для хранения молочной продукции и прочее. При этом ставятся задачи сварки пищевых и технических нержавеющей сталей толщиной до 3–4 мм встык, внахлест, иногда прорезными швами. Здесь, как правило, применяют контактную [2] или аргонодуговую сварку [3], реже — плазменную [4].

Отметим, что при сварке алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей существует большое количество проблем, связанных с получением тонколистовых конструкций. Поэтому актуальной является разработка универсального способа сварки, пригодного для монтажа таких конструкций из столь разных по своим свойствам материалов. В последнее время для решения таких задач все более широко применяют лазерные технологии [5, 6]. Несмотря на признанную перспективность лазерной сварки, существуют определенные причины, тормозящие ее применение.

© И. В. Кривцун, А. И. Бушма, В. Ю. Хаскин, 2013

Одной из таких причин является невысокий коэффициент поглощения лазерного излучения металлами [7]. Особенно явно это прослеживается у алюминиевых сплавов, которые сочетают высокий коэффициент отражения излучения со значительной теплопроводностью. Решить эту проблему можно путем повышения мощности излучения, что приводит к увеличению стоимости лазерного оборудования и, как следствие, росту стоимости погонного метра сварного шва, а также путем применения комбинированных или гибридных лазерно-дуговых технологий [8].

Другой важной проблемой, возникающей при лазерной сварке, является предварительная подготовка свариваемых кромок. Если при сварке нержавеющей сталей достаточным является их обезжиривание, то при сварке алюминиевых сплавов необходима их очистка от оксидной пленки. Обычно эту операцию выполняют механическим способом (например, шабрением) или химическим травлением в водно-щелочном растворе. С применением более экономичных дуговых способов сварки подготовка кромок под сварку значительно упрощается за счет процесса катодной очистки алюминиевых поверхностей от оксидной пленки путем использования разнополярных импульсов [9]. Если объединить лазерную сварку с одним из дуговых способов сварки, проблему предварительной подготовки кромок можно решить достаточно просто.

Однако из-за достаточно высокой стоимости лазерного оборудования этот способ на сегодняшний день не получил широкого распространения. Одним из путей снижения стоимости лазерного оборудования является снижение его выходной мощности за счет частичной ее замены плазменно-дуговой составляющей в сварочном процессе [10].

Таким образом, одним из универсальных способов решения многих проблем лазерной сварки является применение гибридной лазерно-дуговой или лазерно-плазменной сварки. Такой подход дает возможность объединить отдельные преимущества лазерной и плазменной сварки с одновременным устранением их недостатков.

Поэтому целью данной работы является определение возможностей и целесообразности технологического применения гибридного лазерно-плазменного способа сварки для получения неразъемных соединений из тонколистовых алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей путем его сравнения с лазерным и плазменным способами.

В ходе проведения технологических исследований применяли диодный лазер с длиной волн излучения $\lambda = 0,808/0,940$ мкм (диаметр фокального пятна 1,2 мм) и CO_2 -лазер с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм (диаметр фокального пятна 0,4 мм). Для объединения сфокусированного лазерного излучения и плазменной дуги был разработан интегрированный плазматрон прямого действия [11]. В нем лазерный пучок и сжатая дуга выводились совместно через общее сопло $\text{Ø}2,0 \dots 2,5$ мм. При сварке расстояние от среза сопла до свариваемого образца составляло порядка 2 мм. Фокальная плоскость лазерного излучения располагалась на глубине 0–0,5 мм относительно поверхности образца. Электрическая дуга интегрированного плазматрона могла работать как на постоянном токе прямой полярности, так и на переменном токе в режиме разнополярных импульсов. Длительность импульсов варьировалась в диапазоне 0,1–99,0 мс, а сила тока — до 110 А на прямой и до 60 А на обратной полярности.

При сварке образцов из сплавов АМц, АМг-3, АМг-5 м, АМг-6 (толщиной $\delta = 0,5 \div 3,0$ мм) диапазон регулирования лазерной мощности составлял 0,8–2,0 кВт, а сварочного тока — 50–110 А при напряжении порядка 20 В. Частота импульсов сварочного тока достигала 1000 Гц. В ряде случаев использовалась присадочная проволока Св-АМг6 ($\text{Ø}1,2$ мм). Плоские образцы сваривались встык и внахлест в защитной среде аргона со скоростью

16,6–91,6 мм/с. Сварка производилась тремя способами: лазерная, плазменная и гибридная лазерно-плазменная.

При выполнении проплавов и сварки встык образцов из нержавеющей стали X18H10T (аустенитного класса) и 08X17T (ферритного класса) толщиной $\delta = 1,0 \div 3,5$ мм диапазон регулирования лазерной мощности составлял 0,7–2,0 кВт, а сварочного тока — 50–110 А при напряжении 18 В. Сварка велась без использования присадочных материалов. В качестве плазмообразующего и защитного газов применялся аргон. Скорость сварки изменялась в пределах 4–30 мм/с. Для сравнения трех способов сварки результаты экспериментов сведены в табл. 1.

Обработка результатов экспериментов показала наличие так называемого гибридного эффекта. Этот эффект заключается в неаддитивном увеличении объема расплавленного металла шва при лазерно-дуговом процессе по сравнению с суммарным объемом металла, расплавленного отдельно лазерным и плазменным способами (рис. 1). Также было установлено, что с уменьшением размера фокального пятна излучения (соответственно, с ростом плотности мощности) ширина шва уменьшается с одновременным увеличением глубины провара, т. е. гибридный эффект становится более явно выраженным, что подтверждает преимущество гибридной сварки по сравнению со сваркой, осуществляемой отдельно лазерным и плазменным способами.

Как было сказано выше, при использовании CO₂-лазера гибридный эффект проявляется значительно интенсивнее за счет меньшего диаметра сфокусированного пятна излучения (большей плотности мощности). Однако несмотря на больший диаметр пятна излучения диодного лазера (и соответственно меньшую плотность мощности по сравнению с CO₂-лазером), меньшая длина волны излучения, а значит и больший коэффициент поглощения

Таблица 1. Режимы проплавов и сварки стыковых соединений на пластинах из нержавеющей стали малых толщин, полученных гибридным лазерно-плазменным, лазерным и плазменным способами

Номер образца	Марка стали	Толщина, мм	Способ сварки	Мощность лазера, кВт	Скорость сварки, м/ч	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Примечание
181.1	08X17T	3,5	Лазер	2,0	21,6	—	—	Нет провара
181.2	08X17T	3,5	Плазма	—	21,6	100	18	Нет провара
181.3	08X17T	3,5	Гибрид	2,0	21,6	100	18	Провар
184.1	08X17T	3,5	Лазер	2,0	27,6	—	—	Нет провара
184.2	08X17T	3,5	Плазма	—	27,6	100	18	Нет провара
184.3	08X17T	3,5	Гибрид	2,0	27,6	100	18	Провар с провисанием
189.1	08X17T	3,5	Лазер	2,0	14,4	—	—	Нет провара
189.2	08X17T	3,5	Плазма	—	14,4	100	18	Нет провара
189.3	08X17T	3,5	Гибрид	2,0	14,4	100	18	Качественный провар
190.1	08X17T	3,5	Лазер	2,0	14,4	—	—	Нет провара
190.2	08X17T	3,5	Плазма	—	14,4	100	18	Нет провара
190.3	08X17T	3,5	Гибрид	2,0	14,4	100	18	Качественный провар
191.1	08X17T	3,5	Лазер	2,0	14,4	—	—	Нет провара
191.2	08X17T	3,5	Плазма	—	14,4	100	18	Нет провара
191.3	08X17T	3,5	Гибрид	2,0	14,4	100	18	Качественный провар
195	X18H10T	1,0	Гибрид	0,7	72	66	18	Провар

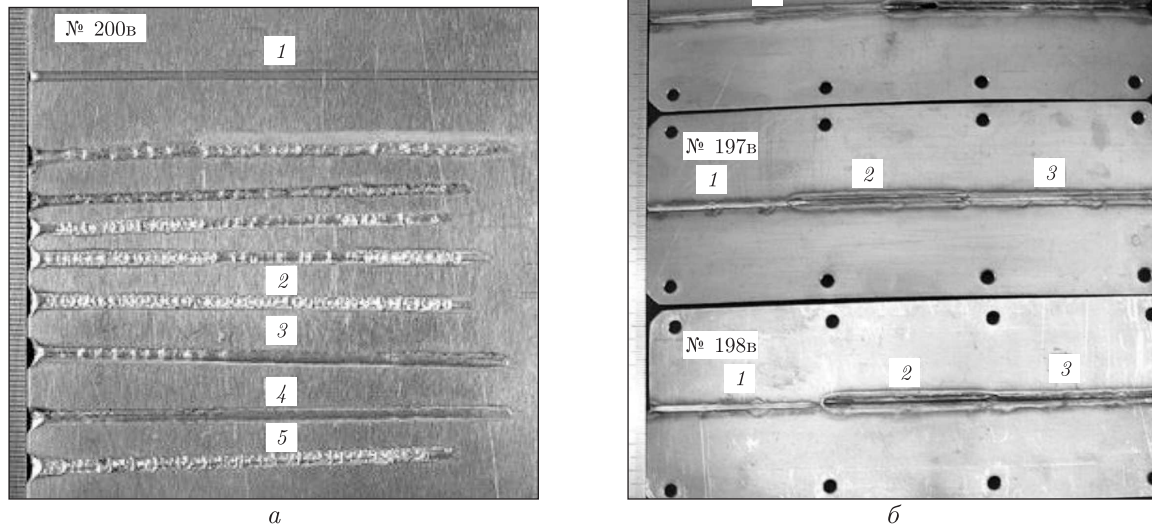


Рис. 1. Внешний вид проваров, полученных различными способами:
a — на образце из алюминиевого сплава АМг6 ($\delta = 1,5$ мм) (1 — лазерным; 2, 5 — плазменным; 3, 4 — гибридным способами); *б* — на образце из стали X18H10T ($\delta = 1,0$ мм) (1 — лазерным; 2 — плазменным; 3 — гибридным способами)

поверхностью свариваемого образца, обеспечивает соизмеримую в обоих случаях глубину проплавления при одинаковой скорости гибридной сварки. Уменьшение диаметра сфокусированного пятна повышает стабильность перемещения анодного пятна плазменной дуги на высоких скоростях, “привязывая” его к зоне действия лазерного излучения.

Проведенные исследования показали, что в рассмотренном диапазоне параметров режимов оптимальным (по критериям качества формирования соединений и уменьшению зернистости структуры) технологическим приемом является увеличение скорости сварки с одновременным соответственным увеличением лазерной и плазменной мощности. При этом соотношение указанных мощностей должно быть близким к 1 : 1 или меняться в сторону увеличения лазерной мощности. Последнее обусловлено тем, что условия горения плазменной дуги улучшаются прямо пропорционально усилению интенсивности испарения металла под действием лазерного излучения.

Еще одним важным результатом проведения технологических исследований процесса гибридной сварки стало определение такого режима, при котором как в случае сварки алюминиевых сплавов, так и при сварке нержавеющей сталей не требуется применение прикладочного материала. Было установлено, что если лазерно-плазменным способом добиться формирования сварного шва, при котором ширина нижнего валика не будет превышать четверть ширины верхнего валика, то не только будет отсутствовать провисание шва, но также возможно сформировать усиление верхнего валика высотой порядка 0,5 мм (для толщин порядка 3–4 мм). При этом форма поперечного сечения шва наиболее приближена к той, что наблюдается при лазерной сварке.

Для проведения механических испытаний и определения временного сопротивления разрыву из качественных участков швов, сваренных тремя сравниваемыми способами, вырезали по три образца Ми-96 (ГОСТ 6996-66). Кроме того, были вырезаны три аналогичных

образца из основного металла (сплавов АМг6, АМг3 и сталей Х18Н10Т, 08Х17Т). Испытание проводилось при температуре +20 °С на разрывной машине ЦДМ-4.

Механические испытания стыковых соединений из сплава АМг6 на временное сопротивление разрыву (σ_B , МПа) при гибридной сварке без присадки показали значения порядка 90% от $[\sigma_B]$ основного металла при отсутствии пор, т. е. значения порядка 325 МПа. Во всех случаях разрыв проходил вне швов. Для нахлесточных соединений показатели прочности были аналогичными. Для полученных лазерно-плазменным способом соединений из сплава АМг3 значения временного сопротивления разрыву были весьма низкими — около 60% от $[\sigma_B]$ основного металла (т. е. порядка 135 МПа), а образцы разрывались по осям швов. Это объяснялось обнаруженным в швах значительным количеством внутренних пор. Устранение пористости швов за счет применения предварительной подготовки кромок и улучшения газовой защиты верхней и нижней сторон сварочной ванны позволило добиться повышения прочности соединений из сплава АМг3 до значений $(0,8 \div 0,9)\sigma_B$, т. е. порядка 180–190 МПа.

Полученные результаты испытаний на временное сопротивление разрыву σ_B [МПа] стыковых соединений из стали Х18Н10Т, полученных гибридным способом, показали уровень порядка $0,85\sigma_B$ основного металла, т. е. около 650 МПа, что превосходит показатели для соединений, сваренных дуговыми способами [9]. Эти результаты хорошо совпадают с данными по сварке электронным лучом в вакуумной камере образцов из американской стали типа 304SS [12]. В результате проведения испытаний на разрыв образцов из стали 08Х17Т ($\delta = 3,5$ мм) было установлено, что прочность образцов, сваренных гибридным способом, составляет порядка 600–610 МПа, что на 3–5% превышает прочность образцов, полученных лазерным способом, и примерно на 5–7% уступают прочности основного металла (640 МПа).

Приведенные результаты механических испытаний позволяют утверждать, что по прочностным характеристикам гибридная сварка превосходит дуговые способы и является приемлемой для изготовления большинства конструкций.

Металлографический анализ микрошлифов сварных лазерно-плазменным способом соединений из алюминиевых сплавов показал, что зернистость литой зоны швов, как и размер ЗТВ, увеличивается по сравнению с лазерной сваркой. Это, в первую очередь, связано с увеличением объема переплавленного металла. Микротвердость соединений из сплава АМг6 составляла HV_{0,5}–700 ÷ 800 МПа, была достаточно равномерной и примерно одинаковой на линии основной металл–ЗТВ–шов. Как и в предыдущем случае, для сплава АМг3 микротвердость на линии основной металл–ЗТВ–шов была достаточно равномерной и составляла HV_{0,5}–540 ÷ 580 МПа. Структура швов, выполненных гибридным способом, во всех случаях имела дендритное мелкодисперсное строение. Выделение фаз в шве — дисперсное. Границы сплавления преимущественно без признаков перегрева. В ряде случаев в корневой части швов наблюдаются непрерывные цепочки выделений по границам зерен в зоне термического влияния, непосредственно у границы сплавления. Поскольку эти выделения находятся в нижнем усилении, при необходимости они могут быть удалены после сварки механическим путем.

Микродюрметрический анализ сварных швов из нержавеющей сталей показал, что при лазерной и плазменной сварке склонность к проявлению дисперсии микротвердости в литом металле швов и в ЗТВ большая, чем при гибридной лазерно-плазменной сварке. Более четко это заметно на сталях, склонных к образованию закалочных структур. В нашем случае — это сталь 08Х17Т. Ее микротвердость на линии основной металл–ЗТВ–шов

составляла HV0,5–1600 ÷ 1900 МПа. Отметим, что при лазерной сварке склонность к образованию структур с повышенной твердостью (HV0,5–1800 ÷ 2000 МПа) в большей степени обуславливается высокой термической локальностью процесса и малыми размерами шва и ЗТВ. Это также приводит к образованию закалочных структур в ЗТВ. В отличие от лазерной сварки, при гибридной сварке образование структур с повышенной твердостью обусловлено, преимущественно, высокими скоростями процесса. Поэтому повышение твердости наблюдается, как правило, в литом металле шва (HV0,5–1800 ÷ 1900 МПа). Можно ожидать, что некоторое снижение ударной вязкости при лазерной сварке будет наблюдаться в ЗТВ, а при гибридной — в сварном шве.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Проявление эффекта неаддитивного увеличения глубины проплавления (по сравнению с глубиной проплавления от лазерной и плазменной составляющих), привязка плазменной дуги к зоне действия лазерного излучения и стабильность ее горения при высокоскоростной гибридной сварке в большей степени связаны со степенью фокусировки лазерного излучения, чем с длиной его волны.

2. Применение гибридной лазерно-плазменной сварки тонколистовых алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей позволяет в 2–4 раза повысить глубину проплавления по сравнению с лазерной сваркой и примерно во столько же раз повысить скорость сварки по сравнению с плазменной. При этом важным технологическим преимуществом является катодная очистка свариваемых поверхностей алюминиевых сплавов от окисной пленки.

3. Временное сопротивление разрыву соединений из тонколистовых алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей, выполненных лазерно-плазменной сваркой, составляет порядка 0,8–0,9 прочности основного металла, что является вполне приемлемым результатом с позиций промышленного применения способа.

4. Структуры сварных соединений, 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, и положительно сказывается на снижении остаточных термических деформаций сваренных образцов.

1. *Shibata K., Iwase T., Sakamoto H., Kasukawa M.* Welding of Aluminum car body parts with twin-spot high power Nd: YAG laser // *J. of Light Metal Welding and Construction.* – 2003. – **41**, No 4. – P. 25–34.
2. *Чулошников П. Л.* Контактная сварка. – Москва: Машиностроение, 1977. – 144 с.
3. *Паршин С. Г.* Технология ручной аргонодуговой сварки труб из стали 12Х1МФ с применением активирующих флюсов. – Дис. ... канд. техн. наук, 05.03.06. – Тольятти: Тольят. политехн. ин-т, 2001. – 135 с.
4. *Малаховский В. А.* Плазменная сварка. – Москва: Высш. шк., 1987. – 80 с.
5. *Tsukamoto S.* Laser welding // *Welding International.* – 2003. – **17**. – No 10. – P. 767–774.
6. *Volpone M., Mueller S. M.* Laser e Friction Stir Welding – Due Tecnologie di Giunzione Emergenti. Confronto su Vantaggi e Limitazioni // *Rivista Italiana della Saldatura.* – 2005. – No 5. – P. 683–691.
7. *Абильситов Г. А., Голубев В. С., Гонтарь В. Г. и др.* Технологические лазеры: Справочник. В 2-х т. – Т. 1. Расчет, проектирование и эксплуатация / Под ред. Г. А. Абильситова. – Москва: Машиностроение, 1991. – 432 с.
8. *Ishide T., Tsubota S., Watanabe M., Ueshiro K.* Development of TIG-YAG and MIG-YAG hybrid welding // *Welding International.* – 2003. – **17**, No 10. – P. 775–780.
9. *Патон Б. Е., Гвоздецкий В. С., Дудко Д. А. и др.* Микроплазменная сварка. – Киев: Наук. думка, 1979. – 248 с.
10. *Шелягин В. Д., Хаскин В. Ю., Гаращук В. П. и др.* Гибридная сварка излучением CO₂-лазера и дугой плавящегося электрода в углекислом газе // *Автомат. сварка.* – 2002. – № 10. – С. 38–41.

11. Патон Б. Е., Гвоздецкий В. С., Кривцун И. В. и др. Гибридная лазерно-микроплазменная сварка металлов малых толщин // Там же. – 2002. – № 3. – С. 5–9.
12. Назаренко О. К., Кайдалов А. А., Ковбасенко С. Н. и др. Электронно-лучевая сварка / Под ред. Б. Е. Патона. – Киев: Наук. думка, 1987. – 256 с.

*Институт электросварки им. Е. О. Патона
НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 05.11.2012

Академік НАН України І. В. Кривцун, О. І. Бушма, В. Ю. Хаскін

Лазерно-плазмове зварювання нержавіючих сталей та алюмінієвих сплавів

Вивчено технологічні особливості та можливості гібридного лазерно-плазмового способу зварювання тонколистових алюмінієвих сплавів та нержавіючих сталей без застосування присаджувального матеріалу, а також проведено його порівняння з плазмовим та лазерним зварюванням. Досліджено основні властивості зварних з'єднань, виконаних гібридним способом, виявлені їх механічні характеристики і основні структурні особливості. Показана перспективність практичного застосування лазерно-плазмового зварювання тонколистових алюмінієвих сплавів і нержавіючих сталей.

Academician of the NAS of Ukraine I. V. Krivtsun, A. I. Bushma, V. Yu. Khaskin

Laser-plasma welding of stainless steels and aluminum alloy

The technological features and capabilities of the hybrid laser-plasma welding method of sheet aluminum alloys and stainless steels without the use of a filler material have been studied, as well as its comparison with plasma and laser weldings has been carried out. The basic properties of welded joints made by the hybrid method have been investigated; their characteristic mechanical properties and the major structural features have been revealed. The prospects of practical applications of the laser-plasma welding of thin sheets of aluminum alloys and stainless steels are shown.