



ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

И. В. КРИВЦУН, А. И. БУШМА, В. Ю. ХАСКИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Сварка тонколистовых соединений нержавеющей стали находит применение во многих отраслях промышленности. Как правило, для этих целей используют аргонодуговую, контактную или плазменную сварки. Изучение передового мирового опыта применения сварочных процессов показало, что в последнее время интенсивно развиваются исследования по применению гибридной лазерно-плазменной сварки для решения подобных задач. Изучению технологических возможностей такого сварочного процесса и посвящена данная работа. Проведены технологические исследования гибридной лазерно-плазменной сварки нержавеющей стали аустенитного и ферритного классов, а также ее сравнение с процессами плазменной и лазерной сварки. Определены механические свойства сварных соединений, выполненных гибридным способом, а также изучена их структура. Показаны перспективы практического применения лазерно-плазменной сварки тонколистовых соединений нержавеющей стали. Найдены диапазоны режимов гибридной сварки нержавеющей стали, при которых отсутствует необходимость использования присадочных материалов. Установлено, что соединения, полученные таким способом, по своим механическим свойствам и качеству формирования швов не уступают лазерной сварке, а в ряде случаев превосходят ее и существенно превосходят качество формирования швов, обеспечиваемое плазменной сваркой. При этом производительность гибридной сварки превышает производительность лазерной в 2...3 раза, а производительность плазменной — до четырех раз. Библиогр. 9, табл. 2, рис. 6.

Ключевые слова: нержавеющие стали, гибридная лазерно-плазменная сварка, лазерное излучение, диодный лазер, гибридный эффект, структуры, микротвердость, механические свойства, перспективы применения

В настоящее время во многих отраслях промышленности существует ряд задач, связанных с необходимостью сварки тонкостенных изделий из нержавеющей стали, таких как: изготовление сильфонных компенсаторов для атомной энергетики и пищевой промышленности, емкостей 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. Как правило, для решения таких задач используют контактную [1] или аргонодуговую сварку [2], реже — плазменную [3].

Вопрос использования того или иного способа сварки связан с определенными оптимизационными требованиями (стоимость оборудования и его эксплуатации, качество получаемых соединений, их прочность и долговечность, наличие или отсутствие остаточных деформаций и др.). К сожалению, применяемые способы сварки не всегда полностью удовлетворяют указанным требованиям. Например, одним из лучших способов сварки (при отсутствии остаточных деформаций и получении высококачественных и долговечных соединений) является лазерная сварка. Однако, из-за сравнительно высокой стоимости лазерного оборудования этот способ на сегодняшний день не получил широкого распространения. Одним из путей снижения стоимости лазерного оборудова-

ния является снижение его выходной мощности за счет частичной ее замены плазменно-дуговой составляющей в сварочном процессе. Такой процесс называется гибридной лазерно-плазменной (или лазерно-дуговой) сваркой [4, 5]. Если при этом сохранить качество сварных соединений близким к качеству сварных соединений, полученных лазерной сваркой, возможно получение новой перспективной сварочной технологии. Исследованию этой возможности и посвящена данная статья.

Исследования процесса гибридной лазерно-плазменной сварки нержавеющей стали проводили согласно технологической схеме, приведенной на рис. 1. В ходе экспериментов применяли диодный лазер с длинами волн излучения 0,808 и 0,940 мкм. С помощью фокусирующей оптики диаметр фокального пятна изменяли в интервале 1,0...1,5 мм. Лазерное излучение совмещали со сжатой электрической дугой. Для этого был разработан интегрированный плазматрон прямого действия [6]. В нем сфокусированное лазерное излучение и сжатую дугу выводили совместно через общее сопло (диаметр 2,0...2,5 мм) на свариваемый образец, расположенный на расстоянии порядка 2 мм от среза сопла. Фокальную плоскость лазерного излучения располагали на глубине 0...0,5 мм относительно поверхности образца. В экспериментах применяли электрическую

Таблица 1. Химический состав образцов из нержавеющей стали, мас. %

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	S	P	Cu	Ti
08X17T	≤0,08	≤0,8	≤0,8	16,0...18,0	≤0,3	≤0,6	≤0,2	≤0,2	≤0,025	≤0,035	≤0,3	≤0,8
X18H10T	≤1,0	≤0,8	≤2,0	17,0...19,0	≤0,4	10,0...12,0	≤0,2	≤0,2	≤0,2	≤0,035	≤0,4	≤0,7

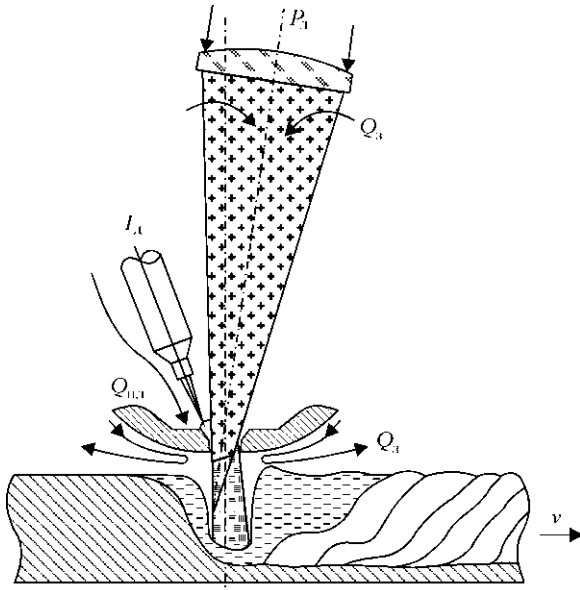


Рис. 1. Схема процесса гибридной лазерно-плазменной сварки нержавеющей стали: $P_{\text{л}}$ — мощность лазерного излучения; v — скорость сварки; $I_{\text{д}}$ — ток дуги; $Q_{\text{пл}}$ — расход плазмообразующего газа; $Q_{\text{з}}$ — расход защитного газа

дугу непрерывного действия с прямой полярностью. Силу тока дуги интегрированного плазмотрона плавно регулировали до 110 А при напряжении на дуге до 20 В.

При выполнении проваров и сварки встык образцов из нержавеющей стали X18H10T (аустенитного класса) и 08X17T (ферритного класса) толщиной $\delta = 1,0...3,5$ мм диапазон регулирования лазерной мощности составлял 0,7...2,0 кВт, а сварочного тока — 50...110 А при напряжении 18 В. Химический состав использованных сталей приведен в табл. 1. Сварку выполняли без использования присадочных материалов. В качестве плазмообразующего и защитного газов использовали аргон. Скорость сварки изменяли в диапазоне 14...108 м/ч (3,8...30 мм/с). Рассматривали три способа сварки: лазерный, плазменный и гибридный лазерно-плазменный (гибридный). Результаты, полученные в ходе проведения экспериментов, приведены в табл. 2.

В большинстве случаев, при выбранном соотношении толщин образцов и скоростей сварки, лазерный и плазменный процессы в отдельности не позволяли достичь полного провара, в то время как гибридная лазерно-плазменная сварка обеспечивала качественное формирование швов (рис. 2). К недостаткам плазменного процесса также следует отнести уход анодного пятна от

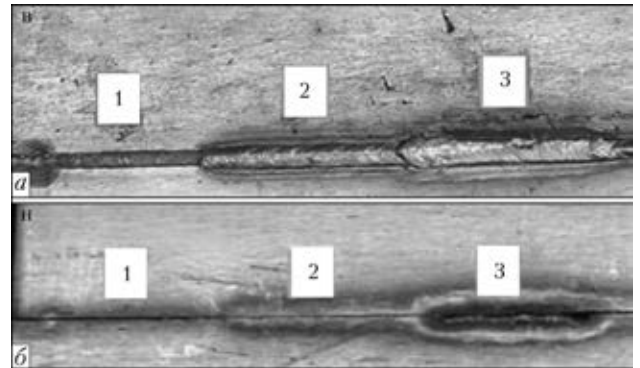


Рис. 2. Внешний вид верхней (а) и нижней (б) стороны стыкового соединения образцов, выполненных из стали 08X17T ($\delta = 3,5$ мм): 1 — лазерная; 2 — плазменная; 3 — гибридная сварка

стыка, что наблюдалось даже при минимальной депланации собранного в струбцине стыка. Этот недостаток связан не только с депланацией свариваемого образца, но и с эффектом блуждания анодного пятна, проявляющемся тем заметнее, чем выше скорость сварки [3].

Во всех случаях формирование верхнего валика шва было качественным. Формирование нижнего валика (гибридный процесс) зависело от плотности мощности лазерного излучения, т. е. величины фокального пятна. При минимальной величине пятна (соответственно с ростом плотности мощности излучения) стабильность формирования нижнего валика повышалась, а эффект блуждания анодной области плазменной дуги минимизировался. По мнению авторов, большее влияние на этот процесс оказывала не мощность лазерного излучения, а стабилизация излучением плазменной дуги («привязка» дуги к сфокусированному пучку [7]).

В ходе проведения экспериментов было установлено наличие «гибридного» эффекта, который заключается в неаддитивном увеличении объема расплавленного металла шва при лазерно-дуговом процессе по сравнению с суммарным объемом металла шва, расплавленного отдельно лазерным и плазменным способами (см. табл. 2). Также было установлено, что с уменьшением размера фокального пятна излучения (соответственно с ростом плотности мощности излучения) ширина шва уменьшается с одновременным увеличением глубины провара, т. е. «гибридный» эффект становится более явно выраженным.

Таблица 2. Режимы сварки стыковых соединений (сталь 08X17T) и проваров (сталь X18H10T) (пластины, $\delta = 3$ мм)

Марка стали	Способ сварки	Погонная энергия, Дж/мм	Мощность лазера, кВт	Скорость сварки, м/ч	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Результат
08X17T	Лазерный	360	2,0	20	—	—	
08X17T	Плазменный	357	—	20	110	20	
08X17T	Гибридный	375	1,0	20	60	20	
X18H10T	Лазерный	75	1,0	50	—	—	
X18H10T	Плазменный	140	—	50	110	20	
X18H10T	Гибридный	137	1,0	50	50	20	

Еще одним важным результатом проведения технологических исследований процесса гибридной сварки стало определение такого режима, при котором не требуется применение присадочного материала. Было установлено, что если лазерно-дуговым способом обеспечить выполнение сварного шва в соединении листов толщиной 3,0...3,5 мм, при котором ширина нижнего валика не будет превышать четверть ширины верхнего валика, то при этом может не наблюдаться провисания шва, и более того, возможно формирование усиления в валике высотой около 0,5 мм. При этом форма поперечного сечения шва наиболее приближена к той, что наблюдается при лазерной сварке.

Исследования микротвердости сварных швов показали, что в случае лазерной и плазменной сварки нестабильность твердости в литом металле швов и в металле зоны термического влияния (ЗТВ) больше, чем в случае гибридной лазерно-плазменной сварки. Более четко эта зависимость прослеживается при исследовании сталей, склонных к образованию закалочных структур. В нашем случае — это сталь 08X17T (рис. 3). Отметим, что при лазерной сварке образование структур с

повышенной твердостью в большей степени обусловлено высокой термической локальностью процесса и малыми размерами шва и ЗТВ (рис. 3, а). Это также приводит к образованию закалочных структур в металле ЗТВ. В отличие от лазерной сварки, при гибридной образовании структур с повышенной твердостью обусловлено, преимущественно, высокими скоростями процесса. Поэтому повышение твердости наблюдается в основном в литом металле шва (рис. 3, в). Некоторого снижения ударной вязкости при лазерной сварке можно будет ожидать в металле ЗТВ, а при гибридной — сварного шва.

Для проведения механических испытаний из качественных участков швов, сваренных тремя сравниваемыми способами, были вырезаны образцы: Ми-96 (ГОСТ 6996–66) — для определения временного сопротивления разрыву (рис. 4) и Ми-50 (ГОСТ 9454–78) — для определения ударной вязкости. Испытания на временное сопротивление разрыву проводили на разрывной машине ЦДМ-4 при +20 °С. Для этого из образца № 195 были вырезаны по три темплета для стыкового соединения, полученного гибридным способом, и для основного металла (ОМ). Полученные результаты испытаний

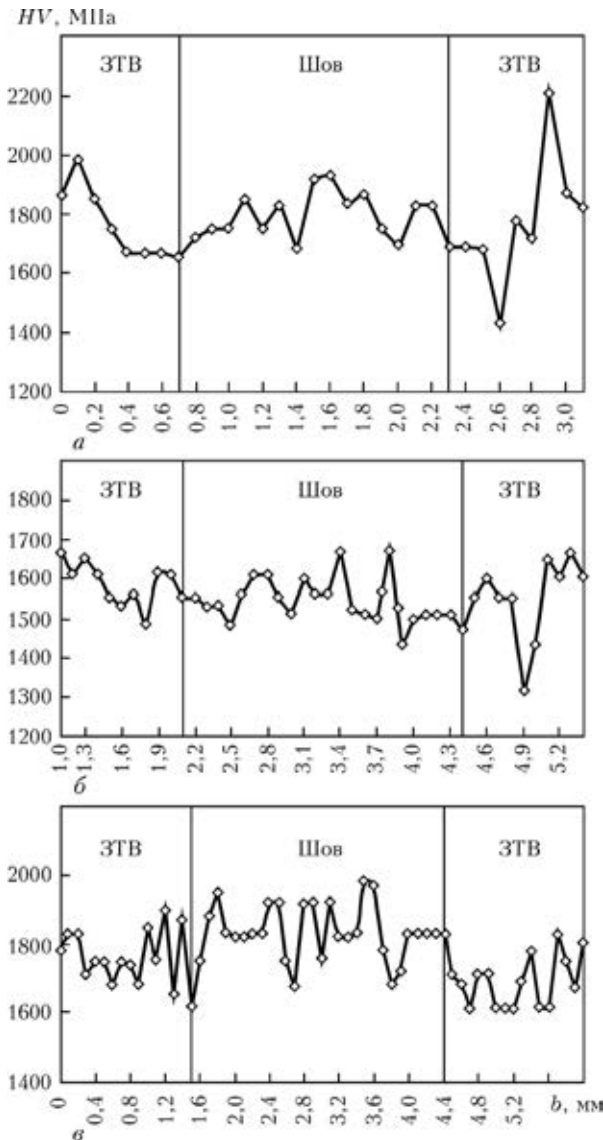


Рис. 3. Замеры микротвердости (нагрузка 50 г) в поперечном сечении швов образцов, выполненных из стали 08X17T ($\delta = 3,5$ мм), лазерным (а), плазменным (б), гибридным (в) способами

на временное сопротивление разрыву σ_b стыковых соединений из стали X18N10T (место разрыва – околшовная зона) показали уровень σ_b для сварного соединения порядка $0,85\sigma_b$ ОМ ($\sigma_b = 620...679$ МПа

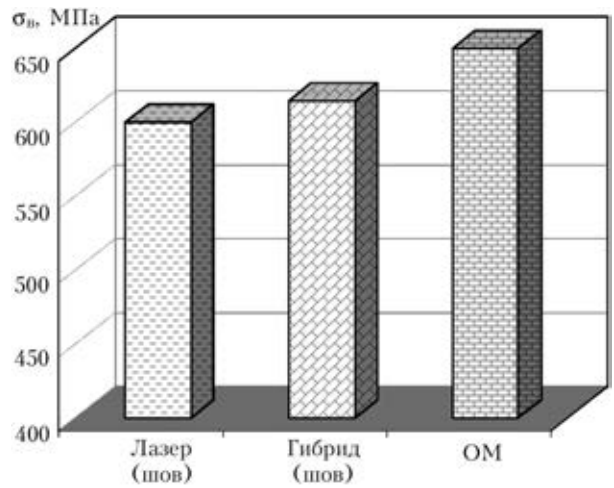


Рис. 5. Временное сопротивление разрыву образцов, выполненных из стали 08X17T

для сварного соединения при σ_b для ОМ 750...760 МПа), что превосходит показатели для сварных соединений, полученных дуговыми способами [8]. Эти результаты хорошо совпадают с данными по сварке электронным лучом в барокамере образцов из американской стали типа 304 [9].

Для проведения испытаний на разрыв образцов из стали 08X17T ($\delta = 3,5$ мм) изготовили темплеты образцов лазерной и гибридной сварки (серии по три шт.), полученных при одном и том же режиме. Также были изготовлены образцы из ОМ. Испытания проводили на той же разрывной машине при $+20$ °С. Было установлено, что прочность образцов, сваренных гибридным способом на 3...5 % превышает прочность образцов, полученных лазерным и примерно на 5...7 % уступает прочности ОМ (рис. 5).

Испытания на ударную вязкость KCV (по методу Шарпи) проводили согласно ГОСТ 9454–78 на маятниковом копре К-15 при $+20$ °С. Результаты этих испытаний, полученных на образцах Ми-50 из стали 08X17T ($\delta = 3,5$ мм), приведены на рис. 6. Как и ожидалось, снижение ударной вязкости сварных соединений, полученных лазерным способом, наблюдали в металле ЗТВ, а сни-

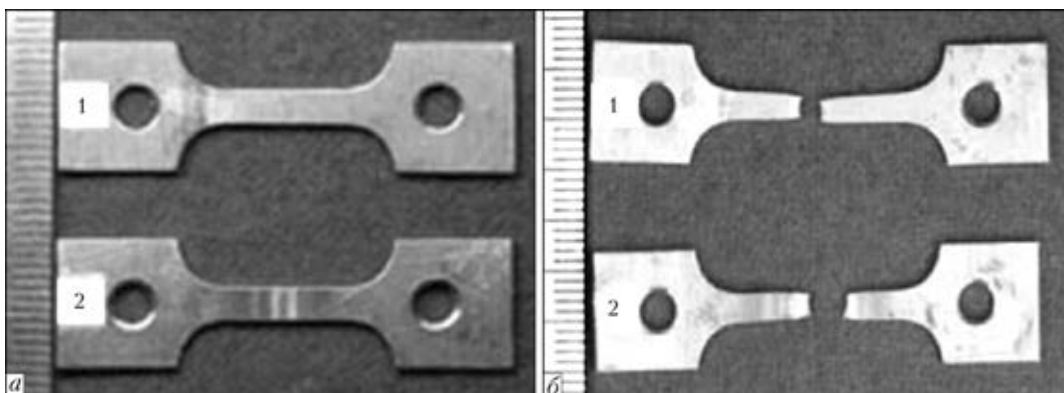


Рис. 4. Внешний вид образцов Ми-96 (сталь X18N10T, $\delta = 1,0$ мм) до (а) и после (б) испытания на разрыв: 1 — ОМ; 2 — стыковое соединение

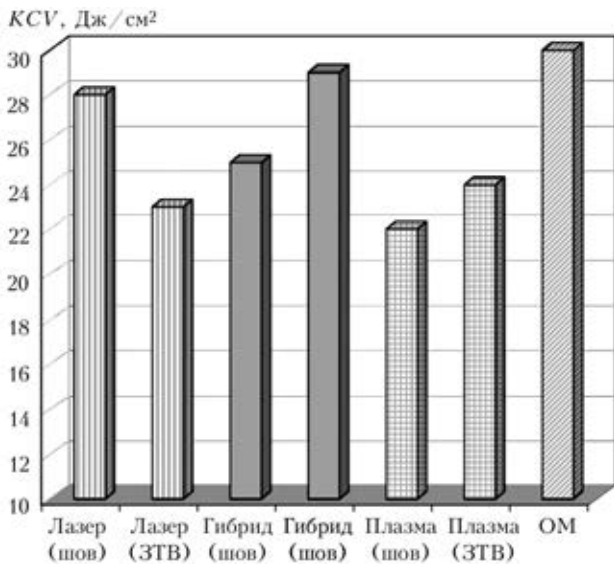


Рис. 6. Ударная вязкость образцов, выполненных из стали 08X17T

жение ударной вязкости соединений, полученных гибридным способом — в литом металле шва. Распределение ударной вязкости в сварных соединениях, полученных плазменным способом, подобно наблюдаемому при гибридном способе, с той только разницей, что вязкость в полученном плазменной сваркой шве меньше примерно на 10 %, а в металле ЗТВ — на 15...18 %.

Таким образом, проведенные исследования показали перспективность способа гибридной лазерно-плазменной сварки для решения промышленных задач соединения тонколистовых (до 3...4 мм) нержавеющей сталей как аустенитного, так и ферритного классов. Установлено, что при гибридной

сварке таких сталей отсутствует необходимость использования присадочных материалов. Сварные соединения, полученные этим способом, по своим механическим свойствам не уступают качеству соединений, полученных лазерной сваркой, в ряде случаев его превосходят, а также существенно превосходят качество соединений, полученных плазменной сваркой. При этом производительность гибридной сварки превышает производительность лазерной в 2...3 раза, а производительность плазменной — до четырех раз.

1. Чулошников П. Л. Контактная сварка. — М.: Машиностроение, 1977. — 144 с.
2. Паришин С. Г. Технология ручной аргодуговой сварки труб из стали 12X1МФ с применением активизирующих флюсов: Дис. ... канд. техн. наук. — Тольятти: ТолПИ, 2001. — 135 с.
3. Малаховский В. А. Плазменная сварка. — М.: Высш. шк., 1987. — 80 с.
4. Studies on characteristics of CO₂ laser-GTAW hybrid welding of austenitic stainless steel / R. Kaul, H. Kumar, B. T. Rao et al. // J. Laser Appl. — 2010. — № 22. — P. 79–86.
5. Simulation on temperature and residual stress field of laser-MIG hybrid welding of A6N01-T5 alloy / D. Li, H. Ji, Y. Liu et al. // Adv. Mater. Res. — 2011. — Nov., V. 399–401. — P. 2040–2043.
6. Гибридная лазерно-микроплазменная сварка металлов малых толщин / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, И. В. Кривцун и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 3. — С. 5–9.
7. Гибридная сварка излучением CO₂-лазера и дугой плавящегося электрода в углекислом газе / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, В. П. Гарашук и др. // Там же. — 2002. — № 10. — С. 38–41.
8. Микроплазменная сварка / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, Д. А. Дудко и др. — Киев: Наук. думка, 1979. — 248 с.
9. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.

Поступила в редакцию 04.09.2012

НОВОСТИ КЗЭСО

В цехе путевой техники Каховского завода электросварочного оборудования прошли успешные испытания машины К 924, предназначенной для контактной стыковой сварки элементов железнодорожных крестовин из специальной стали. Машина уже отправлена заказчику в Россию.

Это уникальная машина в своем классе и на сегодня существует в нескольких экземплярах. Высокое качество и инновационность К 924 производства КЗЭСО подтверждается ее востребованностью среди железнодорожных предприятий и компаний по изготовлению стрелочных переводов нового поколения. Украина, Россия, Южная Корея — страны, на предприятиях которых работает машина. На очереди производство К 924 для железнодорожников Казахстана.

