

УДК 621.791.725: 621.791.755.5

Сидорец В. Н., Бушма А. И., Хаскин В. Ю.

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

В современной промышленности существует ряд задач, связанных с необходимостью сварки тонкостенных изделий из нержавеющей сталей. Примерами таких задач могут быть изготовление сильфонных компенсаторов для атомной энергетики 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. 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 комплексом причин (а точнее – оптимизационных требований), среди которых стоимость оборудования и его эксплуатации, качество получаемых соединений, их прочность и долговечность, наличие или отсутствие остаточных деформаций и т. д. Применяемые способы сварки не всегда полностью удовлетворяют указанному комплексу требований. Например, одним из лучших способов сварки с позиций отсутствия остаточных деформаций, получения 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 оборудования является снижение его выходной мощности за счет частичной ее замены плазменно-дуговой составляющей в сварочном процессе. Такой процесс называется гибридной лазерно-плазменной сваркой [4]. Если при этом сохранить качество сварных соединений близким к качеству лазерной сварки, возможно получение новой перспективной сварочной технологии.

Поэтому целью настоящей статьи послужило исследование возможностей применения и перспектив дальнейшего развития такой новой сварочной технологии, как гибридная лазерно-плазменная сварка нержавеющей сталей.

Исследования процесса гибридной лазерно-плазменной сварки нержавеющей сталей проводились согласно технологической схеме, приведенной в работе [4]. В ходе экспериментов применяли диодный лазер с длинами волн излучения  $\lambda = 0,808/0,940$  мкм. За счет применения различной фокусирующей оптики диаметр фокального пятна изменяли в пределах 1,0–1,5 мм. Лазерное излучение совмещали со сжатой малоамперной дугой, для чего был разработан интегрированный плазмотрон прямого действия [5]. В нем сфокусированное лазерное излучение и сжатая дуга выводились совместно через общее сопло  $\varnothing 2,0\text{--}2,5$  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 дугу непрерывного действия с прямой полярностью. Сила тока дуги интегрированного плазмотрона плавно регулировалась до 110 А при напряжении на дуге до 20 В.

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

В большинстве случаев, при выбранном соотношении толщин образцов и скоростей сварки, лазерный и плазменный процесс в отдельности не позволяли достичь полного провара, в то время как гибридная лазерно-плазменная сварка обеспечивала качественное формирование

швов. К недостаткам плазменного процесса также следует отнести уход анодного пятна от стыка, имевший место даже при минимальной деформации собранного в струбцине стыка. Этот недостаток связан не только с деформацией 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. Имевшее место при гибридном процессе формирование нижнего валика 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 усиления повышалась, а эффект блуждания анодной области плазменной дуги минимизировался. По нашему мнению, большее влияние на этот процесс оказывала не мощность лазерного излучения, а стабилизация плазменной дуги лазерным излучением (так называемая привязка дуги к сфокусированному пучку [6]).

В ходе проведения экспериментов было установлено наличие так называемого гибридного эффекта, который 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. 2). 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.

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 добиться формирования сварного шва, при котором ширина нижнего валика не будет превышать четверть ширины верхнего валика, то не только не будет наблюдаться провисания шва, но возможно сформировать верхнее усиление высотой порядка 0,5 мм (для толщины 3,5 мм). При этом форма поперечного сечения шва наиболее приближена к той, что наблюдается при лазерной сварке.

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 и Ми-44 (ГОСТ 9454-78) – для определения ударной вязкости. Испытания на временное сопротивление разрыву проводились на разрывной машине ЦДМ-4 при температуре +20 °С. Для этого из образца № 195 были вырезаны по 3 темплета для стыкового соединения, полученного гибридным способом, и для основного металла. Полученные результаты испытаний на временное сопротивление разрыву  $\sigma_b$  [МПа] стыковых соединений из стали X18H10T (см. табл. 1) показали уровень порядка 0,85  $\sigma_b$  основного металла, что превосходит показатели для соединений, сваренных дуговыми способами [7]. Эти результаты хорошо совпадают с данными по сварке электронным лучом в барокамере образцов из американской стали 304SS [8].

Таблица 1

Результаты испытаний на временное сопротивление разрыву  $\sigma_b$  соединений из стали X18H10T ( $\delta = 1$  мм), сваренных гибридным способом

| № образца | Марка стали | Вид соединения | Место разрыва    | Результаты испытаний $\sigma_b$ , МПа |                 |
|-----------|-------------|----------------|------------------|---------------------------------------|-----------------|
|           |             |                |                  | Сварное соединение                    | Основной металл |
| 195       | X18H10T     | Стыковое       | Околошовная зона | 621; 637; 675                         | 753; 762; 762   |

Для проведения испытаний на разрыв образцов из стали 08X17T ( $\delta = 3,5$  мм) изготавливали темплеты таким образом, чтобы получить серии (по 3 шт.) образцов лазерной и гибридной сварки, полученных на одном и том же режиме. Также были изготовлены образцы из основного металла. Испытания проводили на той же разрывной машине при температуре + 20 °С. В результате было установлено, что прочность образцов, сваренных гибридным способом, на 3–5 % превышает прочность образцов, полученных лазерным способом, и примерно на 5–7 % уступают прочности основного металла (рис. 1).

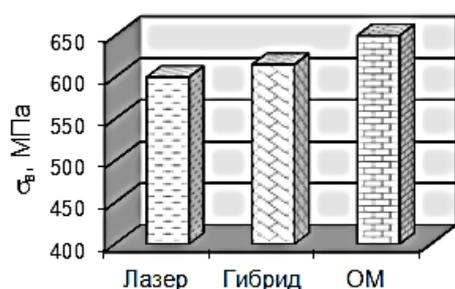


Рис. 1. Результаты испытаний на временное сопротивление разрыву  $\sigma_b$  [МПа] образцов из стали 08X17T ( $\delta = 3,5$  мм), сваренных лазерным и гибридным способами (ОМ – основной металл)

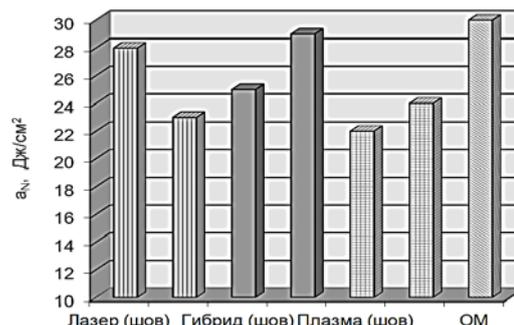


Рис. 2. Результаты испытаний на ударную вязкость KCV  $a_N$  [Дж/см<sup>2</sup>] при температуре + 20 °С из стали 08X17T ( $\delta = 3,5$  мм), сваренных лазерным, гибридным и плазменным способами

Испытания на ударную вязкость KCV (по методу Шарпи) проводили при температуре + 20 °С. Результаты этих испытаний, полученных для образцов Ми-44 из стали 08X17T ( $\delta = 3,5$  мм), приведены на рис. 2. Как и ожидалось, снижение ударной вязкости сварных соединений, полученных лазерным способом, наблюдается в ЗТВ, а снижение ударной вязкости соединений, полученных гибридным способом, – в литом металле шва. Распределение ударной вязкости в соединениях, полученных плазменным способом, подобно наблюдаемому при гибридном способе, с той только разницей, что вязкость в полученном плазменной сваркой шве примерно на 10 % меньше, а в ЗТВ – меньше на 15–18 %.

## ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований 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 отсутствие необходимости применения присадочных материалов при гибридной сварке таких сталей. Соединения, полученные этим способом, по своим механическим свойствам не уступают качеству лазерной сварки, а в ряде случаев его превосходят, и существенно превосходят качество, обеспечиваемое плазменной сваркой. При этом производительность гибридной сварки превышает производительность лазерной в 2–3 раза, а производительность плазменной сварки – до 4 раз.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чулошников П. Л. Контактная сварка / П. Л. Чулошников. – Москва : Машиностроение, 1977. – 144 с.
2. Паршин С. Г. Технология ручной аргонодуговой сварки труб из стали 12Х1МФ с применением активирующих флюсов : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06 : технологии и машины сварочного производства / Сергей Георгиевич Паршин. – Тольятти : Тольяттинский политехнический ин-т, 2001. – 135 с.
3. Малаховский В. А. Плазменная сварка / В. А. Малаховский. – Москва : Высшая школа, 1987. – 80 с.
4. Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов / И. В. Кривцун, В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, В. Ф. Шульм, Е. Г. Терновой // Автоматическая сварка. – 2007. – № 5. – С. 49–53.
5. Гибридная лазерно-микроплазменная сварка металлов малых толщин / [Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, И. В. Кривцун и др.] // Автоматическая сварка. – 2002. – № 3. – С. 5–9.
6. Гибридная сварка излучением CO<sub>2</sub>-лазера и дугой плавящегося электрода в углекислом газе / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, В. П. Гаращук, А. В. Сиора, А. В. Бернацкий, А. В. Сахарнов // Автоматическая сварка. – 2002. – № 10. – С. 38–41.
7. Микроплазменная сварка / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, Д. А. Дудко [и др.]. – Киев : Наукова думка, 1979. – 248 с.
8. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко [и др.]; под ред. Б. Е. Патона. – Киев : Наукова думка, 1987. – 256 с.

Статья поступила в редакцию 30.11.2012 г.