

УДК 621.791.725:621.791.755.5:621.79.025

А.И. Бушма, канд. техн. наук

В.Ю. Хаскин, д-р техн. наук

В.Н. Сидорец, д-р техн. наук

Е.Н. Бердникова, канд. техн. наук

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ ТОНКОЛИСТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

О.І. Бушма, канд. техн. наук

В.Ю. Хаскін, д-р техн. наук

В.М. Сидорець, д-р техн. наук

О.М. Берднікова, канд. техн. наук

Институт электроструєварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОЛИСТОВИХ ВИРОБІВ

O.I. Bushma, PhD in Technical Sciences

V.Yu. Khaskin, Doctor of Technical Sciences

V.M. Sydorets, Doctor of Technical Sciences

O.M. Berdnikova, PhD in Technical Sciences

Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

TECHNOLOGICAL FEATURES OF HIGH-SPEED LASER-PLASMA WELDING OF THIN SHEET PRODUCTS

Изучены технологические особенности и возможности гибридного лазерно-плазменного способа сварки тонколистовых алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей, а также проведено его сравнение с плазменной и лазерной сваркой. Экспериментально определены режимы, использование которых позволяет получать качественное формирование стыковых соединений. Исследованы механические характеристики соединений, выполненных гибридным способом. Показана перспективность практического применения лазерно-плазменной сварки тонколистовых алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, нержавеющие стали, лазерно-плазменная сварка, гибридный эффект.

Вивчено технологічні особливості та можливості гібридного лазерно-плазмового способу зварювання тонколистових алюмінієвих сплавів і нержавіючих сталей, а також проведено його порівняння з плазмовим та лазерним зварюванням. Експериментально визначено режими, застосування яких дозволяє одержати якісне формування стыкових з'єднань. Досліджено механічні характеристики з'єднань, виконаних гібридним способом. Показано перспективність практичного застосування лазерно-плазмового зварювання тонколистових алюмінієвих сплавів і нержавіючих сталей.

Ключові слова: алюмінієві сплави, нержавіючі сталі, лазерно-плазмове зварювання, гібридний ефект.

Technological features and capabilities of hybrid laser-plasma method of thin sheet aluminium alloys and stainless steels without the use of filler material have been studied. Also, its comparison with the plasma and laser welding was been carried out. Operating modes, the use of which allows obtaining high-quality formation of butt joints, was been determined experimentally. The mechanical characteristics of joints made hybrid method are investigated. The prospect of practical application of laser-plasma welding of thin sheet of aluminium alloys and stainless steels is shown.

Key words: aluminium alloys, stainless steels, hybrid laser-plasma welding, hybrid effect.

Постановка проблемы. Среди задач сварки алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей существует большое количество таких, которые относятся к получению тонколистовых конструкций. Одним из характерных примеров может быть изготовление круглых и профильных трубок из алюминиевых сплавов или нержавеющей сталей с толщиной стенки от 0,3 до 3,0 мм. Поэтому актуальна разработка универсального способа сварки, пригодного для высокопроизводительного изготовления деталей и конструкций из указанных материалов.

Анализ последних исследований и публикаций. В последнее время для решения этих задач все более широко применяют лазерные технологии [1]. Несмотря на признанную перспективность лазерной сварки, существуют определенные проблемы, тормозящие ее применение.

Одной из таких проблем является низкое поглощение лазерного излучения металлами, приводящее к снижению эффективного КПД лазерной сварки [2]. Особенно явно это проявляется при лазерной сварке алюминиевых сплавов, сочетающих малый коэффициент поглощения излучения с высокой теплопроводностью. Решением этой проблемы является повышение мощности излучения, что приводит к увеличению стоимости лазерного оборудования и, как следствие, росту стоимости погонного метра сварного шва. Одним из способов решения этой проблемы является использование комбинированных или гибридных лазерно-дуговых сварочных процессов [3]. В таких процессах поверхность металла нагревается до жидкого состояния за счет дуговой составляющей, что способствует резкому повышению коэффициента поглощения и, как следствие, значительному увеличению эффективного КПД сварки.

Другой важной проблемой, возникающей при лазерной сварке, является необходимость в высококачественной предварительной подготовке свариваемых кромок. Их шероховатость должна быть менее Ra 6,3 мкм, а величина зазора между ними не должна превышать 0,1 мм, а величина депланации – 0,01 мм. Если при сварке нержавеющей сталей достаточным является их обезжиривание, то в случае сварки алюминиевых сплавов необходима их очистка от оксидной пленки. Обычно эту операцию выполняют механическим способом (например, шабрением) или химическим травлением в водно-щелочном растворе. Как отмечается в работе [4], процесс катодной очистки алюминиевых поверхностей от оксидной пленки при дуговой сварке разнополярными импульсами тока во многом способствует решению проблемы подготовки кромок под сварку. Если объединить процесс лазерной сварки с одним из экономичных дуговых процессов, решение проблемы предварительной подготовки кромок и стыка можно значительно упростить.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Промышленное применение лазерной сварки затрудняет достаточно высокая стоимость лазерного оборудования, а, следовательно, и изготавливаемых с его помощью изделий. Одним из путей снижения стоимости лазерного оборудования является снижение его выходной мощности за счет частичной ее замены плазменно-дуговой составляющей [5].

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 таких параметров технологических режимов гибридной лазерно-плазменной сварки, которые способствуют формированию качественных стыковых соединений из тонколистовых алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей, а также сравнение эффективности гибридного способа сварки с лазерным и плазменным способами.

Описание эксперимента. В ходе проведения технологических исследований применяли диодный лазер с длинами волн излучения $\lambda=0,808/0,940$ мкм (диаметр фокального пятна 1,2 мм), волоконный лазер с длиной волны $\lambda=1,07$ мкм (диаметр фокального пятна 0,04 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 было разработано несколько конструкций интегрированных плазмотронов прямого действия (рис. 1). В таких плазмотронах лазерный пучок и сжатая дуга выводились совместно через общее сопло $\text{Ø}1,5\dots2,5$ мм. При сварке расстояние от среза сопла до свариваемого образца составляло порядка 1...2 мм. Фокальную плоскость лазерного излучения располагали на глубине 0...0,5 мм относительно поверхности образца. Интегрированный плазмотрон мог работать как в режиме постоянного тока прямой полярности, так и переменного тока в режиме разнополярных импульсов. Длительность импульсов варьировали в диапазоне 0,1...99,0 мс, а силу тока – до 110 А на прямой и до 60 А на обратной полярности [6].

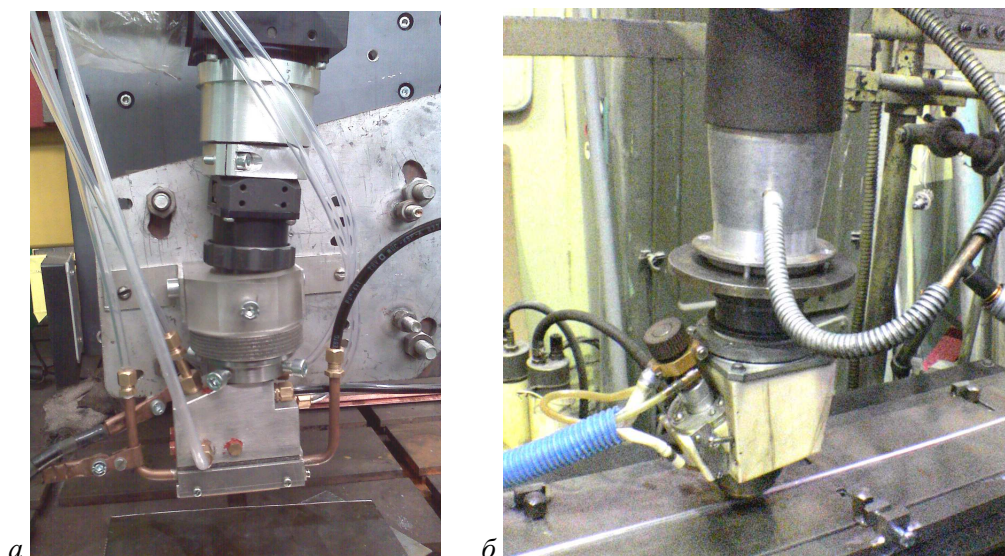


Рис. 1. Интегрированные плазмотроны для лазерно-плазменной сварки с применением излучения волоконного (а) и CO_2 (б) лазеров

При выполнении сварки образцов из сплавов АМц, АМг-3, АМг-5м, АМг-6 (толщиной $\delta=0,5...3,0$ мм) диапазон регулирования лазерной мощности составлял $0,2...2,0$ кВт, а сварочного тока – $50...110$ А при напряжении порядка 20 В. Частота импульсов сварочного тока достигала 1000 Гц. Плоские образцы сваривали встык и внахлест в защитной среде аргона со скоростями $20...90$ мм/с. Сварку выполняли тремя способами: лазерный, микроплазменный и гибридный лазерно-микроплазменный (рис. 2, а-б).

При выполнении проплавов и сварки встык образцов из нержавеющей стали X18N10T (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. Сварку выполняли без использования присадочных материалов. В качестве плазмообразующего и защитного газов использовали аргон. Скорость сварки изменяли в пределах $4...30$ мм/с (рис. 2, в-г).

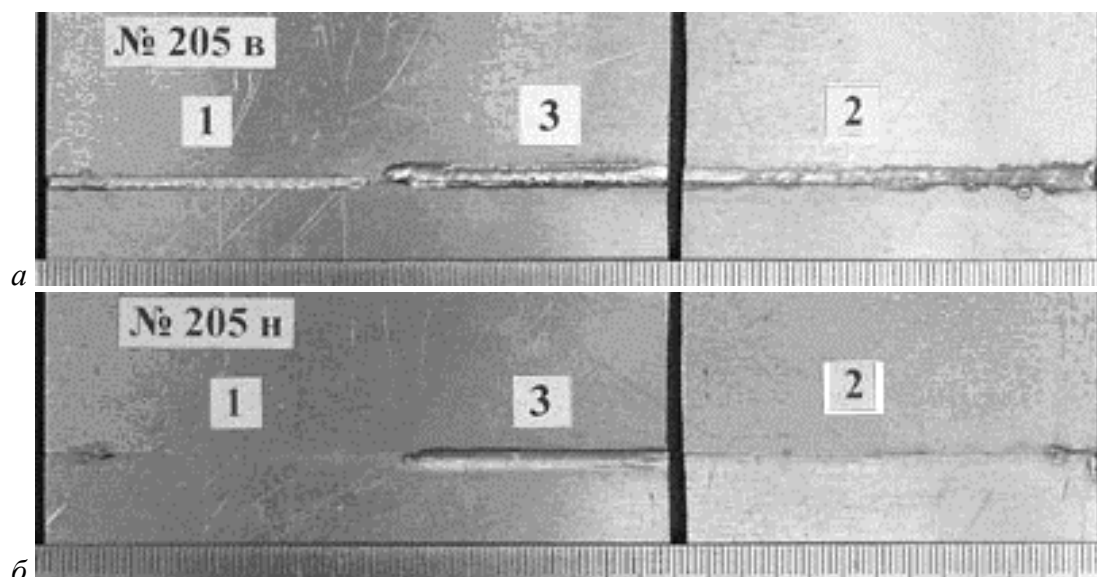


Рис. 2. Сварные швы на сплаве АМг3 толщиной 1,5 мм (а-б) и на нержавеющей стали 08X17T толщиной 3,5 мм (в-г), выполненные лазерным (1), плазменным (2) и гибридным (3) способами: а и в – вид сверху; б и г – вид снизу

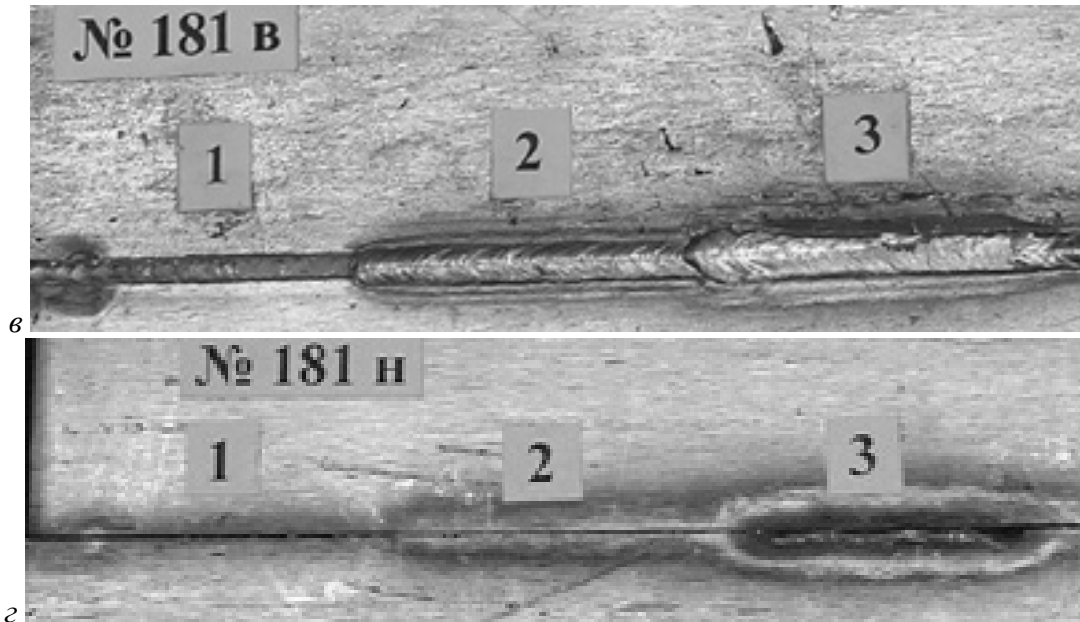


Рис. 2. Окончание (см. также с. 148)

Результаты эксперимента и их обсуждение. Обработка результатов экспериментов показала наличие так называемого гибридного эффекта. Этот эффект заключается в неаддитивном увеличении объема расплавленного металла шва при лазерно-плазменном процессе, по сравнению с суммарным объемом металла, расплавленного отдельно лазерным и плазменным способами. 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. Этот эффект наглядно демонстрирует преимущество гибридной сварки по сравнению со сваркой, осуществляемой отдельно лазерным или плазменным способами.

Известно, что при лазерной сварке с уменьшением длины волны излучения увеличивается глубина провара и скорость процесса. Это связано с изменением поглощающей способности. Длине волны 10,6 мкм (излучение CO_2 -лазера) соответствуют худшие показатели. Нами было проведено исследование влияния длины волны лазерного излучения вышеуказанные показатели при гибридной сварке. Было установлено, что эффект влияния длины волны нивелируется за счет действия плазменной составляющей. Это может быть связано как с возникновением гибридного эффекта, так и с предварительным подогревом свариваемого металла плазмой прямого действия. Дело в том, что расположенная первой по ходу сварки плазменная составляющая гибридного процесса расплавляет свариваемый металл, а жидкий металл имеет значительно более высокий коэффициент поглощения [2].

Опыт гибридной сварки стыковых соединений тонколистовых алюминиевых сплавов показал, что под действием давления дуги происходит провисание шва. Из литературы (например, [3-5]) известно, что для одновременного качественного формирования верхнего и нижнего валика усиления необходимо использовать присадочный материал. Этот материал можно вводить в сварочную ванну в виде проволоки, ленты, прутка, порошка или предварительно установленной при сборке стыка проставки. После проведения сравнительных экспериментальных исследований нами было установлено, что при лазерно-плазменной сварке целесообразно применять присадочный материал в виде достаточно тонкой (0,8-1,2 мм) проволоки. Для сварки алюминиевых сплавов было предложено использовать проволоку Св-АМг6 ($\text{Ø}1,2$ мм), как более высоко легирован-

ную по сравнению с основным металлом. Эксперименты подтвердили, что повышенное содержание легирующих элементов в присадке компенсирует их выгорание в сварочной ванне, происходящее под действием образующегося гибридного энергетического источника. Проволоку подавали в сварочную ванну со скоростями 30...50 мм/с. Это позволило достичь качественного формирования верхнего и нижнего усиленных шва (рис. 3). Еще одним достоинством использования присадочной проволоки является снижение требований к сборке стыка под сварку. Величина зазора между свариваемыми кромками при этом может достигать до 0,5 мм.



Рис. 3. Наплавочные швы на сплаве АМгб толщиной 2,0 мм, выполненные с подачей присадочной проволоки Св-АМгб (Ø1,2 мм) гибридным лазерно-плазменным способом: а – вид сверху; б – вид снизу

На основе проведенных экспериментальных исследований было подобрано несколько режимов лазерно-плазменной сварки, позволяющих обеспечить качественное формирование стыковых соединений алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей (табл.). В ходе этих экспериментов было установлено, что для получения качественной очистки от окисной пленки поверхности алюминиевых сплавов при их гибридной сварке необходимо повышать амплитуду тока обратной полярности. Ток должен быть тем большим, чем выше скорость сварки, и при скоростях свыше 100 м/ч (28 мм/с) может достигать до 50 % (а иногда и более) от величины сварочного тока прямой полярности. Такие высокие значения тока обратной полярности приводят к перегреву и эрозии вольфрамового электрода плазмотрона, что становится причиной преждевременного притупления кончика электрода и попадания вольфрама в сварной шов. Для недопущения этого необходимо учитывать указанную особенность высокоскоростной гибридной сварки и принимать меры по интенсификации тепловой разгрузки электрода.

Сравнение скоростей гибридной сварки со скоростями лазерной и плазменной сварки аналогичных материалов, проводимые при равных погонных энергиях, показали значительное (в 2-4 раза) их повышение. Как отмечалось выше, это связано как с возникновением гибридного эффекта, так и с предварительным подогревом свариваемого металла до жидкого состояния плазмой прямого действия. Последнее повышало поглощающую способность лазерного излучения всех рассматриваемых длин волн как нержавеющей сталями, так и алюминиевыми сплавами. При этом влияние длины волны излучения на глубину провара в значительной степени нивелировалось.

Таблица

Режимы качественной лазерно-плазменной сварки стыковых соединений алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей

№ п/п	Материал	Толщина, мм	Скорость сварки, м/ч	Мощность лазерного излучения, кВт	Ток прямой / обратной полярности, А	Длительность импульса прямой / обратной полярности, мс	Скорость подачи при-садочной проволоки, м/ч
1.	АМгб	1,5	108	1,5	77/50	1,5/0,9	-
2.	АМгб	1,5	108	1,2	63/30	0,8/0,8	-
3.	АМгз	1,5	108	1,0	50/50	1,5/0,9	-
4.	АМгз	2,5	17	1,2	40/38	4,1/4,1	-
5.	АМц	0,8	330	1,0	110/50	0,5/0,5	-
6.	АМц	0,3	307	0,8	53/50	0,5/0,5	-
7.	АМгб	0,8	108	0,8	55/55	1/1	150
8.	АМгб	2,0	72	2,0	100/50	1/1	180
9.	АМг5	2,5	54	2,0	100/50	1/1	180
10.	08Х17Т	3,5	22	2,0	100	-	-
11.	Х18Н10Т	1,0	72	0,7	66	-	-
12.	Х18Н10Т	1,0	94	1,0	50	-	-

Примечание: во всех случаях напряжение на дуге составляло 18...20 В.

Механические испытания проводились при помощи машины MTS 810. Испытания стыковых соединений из сплава АМгб на временное сопротивление разрыву (σ_b , МПа) для случая гибридной сварки без присадки показали значения порядка 90 % от [σ_b] основного металла в случае отсутствия пор, т. е. значения порядка 325 МПа. Во всех случаях разрыв проходил вдалеке от шва и ЗТВ по основному металлу. Для полученных лазерно-плазменным способом соединений из сплава АМгз значения временного сопротивления разрыву оказались весьма низкими – около 60 % от [σ_b] основного металла (т. е. порядка 135 МПа), а образцы разрывались по середине шва.

Для объяснения этого эффекта был проведен неразрушающий рентгеновский контроль соединений из сплава АМгз. В результате установили наличие в швах значительного количества внутренних пор, приводящих к снижению механических свойств соединений. Дальнейшие исследования подтвердили гипотезу водородного происхождения этой пористости. Введение присадочного материала способствовало устранению пористости за счет дополнительного тепловложения в сварочную ванну (тепловложение обеспечивалось расплавленной проволокой). Одновременно с этим, проволока Св-АМгб позволила повысить содержание магния и марганца в сварных швах соединений из сплава АМгз, что привело к повышению механических свойств. Все это, в сочетании с улучшением предварительной подготовки кромок и газовой защиты верхней и нижней сторон ванны, позволило добиться повышения прочности соединений из сплава АМгз до значений $(0,8...0,9) \cdot \sigma_b$, т. е. порядка 180...190 МПа (рис. 4, а). Однако, не смотря на принятые меры, разрыв образцов по-прежнему происходил по шву.

Результаты испытаний на **временное сопротивление разрыву** σ_b [МПа] стыковых соединений из стали Х18Н10Т, полученных гибридным способом, показали уровень порядка $0,85 \cdot \sigma_b$ основного металла, т. е. около 650 МПа, что превосходит показатели для соединений, сваренных дуговыми способами [4]. 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) (рис. 4, б).

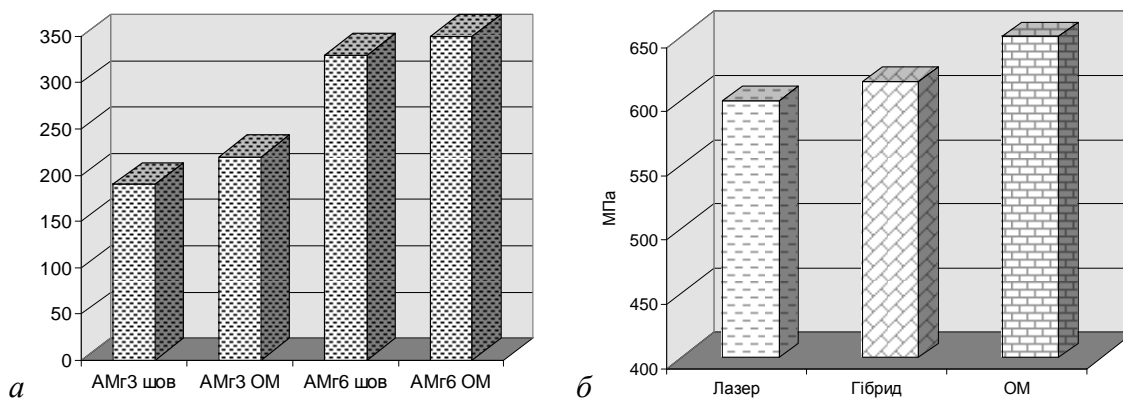


Рис. 4. Временное сопротивление разрыву σ_v [МПа] стыковых соединений из сплавов АМг3 и АМг6 (а) и стали 08Х17Т (б), сваренных гибридным лазерно-плазменным способом (для сравнения приведены значения временного сопротивления разрыву для основного металла ОМ)

Испытания на ударную вязкость KCV по методу Шарпи проводились при помощи маятникового копра К-15 при температуре +20°C. Установлено, что снижение ударной вязкости сварных соединений, полученных лазерным способом, наблюдается в ЗТВ, а снижение ударной вязкости соединений, полученных гибридным способом – в литом металле шва. Это объясняется жестким термическим циклом лазерной сварки, способствующим образованию хрупких закалочных структур в ЗТВ, а также модификацией термического цикла за счет введения плазменной составляющей при гибридной сварке. 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 % (рис. 5). Таким образом, по показателю ударной вязкости гибридная сварка нержавеющей сталей предпочтительнее плазменной.

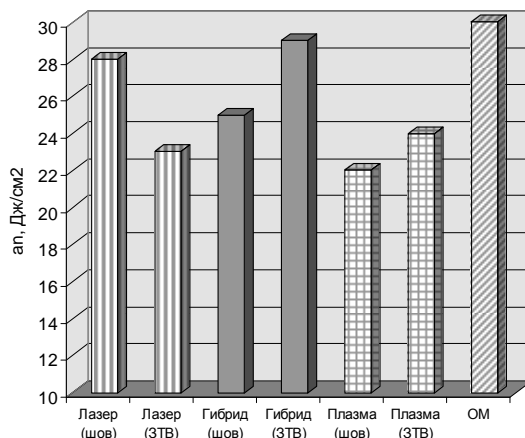


Рис. 5. Ударная вязкость KCV a_N [Дж/см²] при температуре +20°C стыковых соединений из стали 08Х17Т, сваренных лазерным, гибридным и плазменным способами (для сравнения приведено значение ударной вязкости основного металла ОМ)

Выводы.

1. Подогрев и плавление свариваемого металла плазмой прямого действия повышает поглощающую способность лазерного излучения, что в значительной степени снижает влияние длины волны излучения при гибридной лазерно-плазменной сварке нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов. Этот физический эффект обосновывает правомерность технологического применения любого типа лазера для лазерно-плазменной сварки.

2. При лазерно-плазменной сварке с использованием плазмы прямого действия имеет место гибридный эффект, проявляющийся в неаддитивности увеличения глуби-

ны проплавления (по сравнению с глубиной проплавления от лазерной и плазменной составляющих в отдельности).

3. Предварительный подогрев свариваемого металла плазмой прямого действия и возникновение гибридного эффекта при лазерно-плазменной сварке тонколистовых алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей позволяют в 2-4 раза повышать производительность процесса по сравнению с лазерной или плазменной сваркой тех же материалов, выполняемой с аналогичными погонными энергиями.

4. Наиболее важными технологическими преимуществами для массового промышленного применения лазерно-плазменной сварки по сравнению с лазерной являются катодная очистка свариваемых поверхностей алюминиевых сплавов от окисной пленки, а также возможность значительного снижения требований к точности стыковки свариваемых кромок (величина зазора может достигать до 0,5 мм вместо 0,1 мм).

5. По прочностным характеристикам швы, полученные гибридной сваркой, превосходят швы, полученные плазменной, и практически не уступают швам, полученным лазерной сваркой. Это позволяет считать ее перспективной для изготовления изделий ответственного назначения из нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов.

Список использованных источников

1. *Tsukamoto S. Laser Welding / S. Tsukamoto // Welding International. – 2003. – V.17. – No.10. – P. 767-774.*

2. *Технологические лазеры : справочник : в 2 т. Т. 1: Расчет, проектирование и эксплуатация / Г. А. Абилюсипов, В. С. Голубев, В. Г. Гонтарь [и др.] ; под ред. Г. А. Абилюсипова. – М. : Машиностроение, 1991. – 432 с.*

3. *Development of TIG-YAG and MIG-YAG hybrid welding / T. Ishide, S. Tsubota, M. Watanabe, K. Ueshiro // Welding International. – 2003. – V. 17. – No. 10. – P. 775-780.*

4. *Микроплазменная сварка / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, Д. А. Дудко [и др.]. – К. : Наукова думка, 1979. – 248 с.*

5. *Гибридная сварка излучением CO₂-лазера и дугой плавящегося электрода в углекислом газе / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, В. П. Гаращук, А. В. Сиора и др. // Автоматическая сварка. – 2002. – № 10. – С. 38-41.*

6. *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.*