



ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА ТОЛСТОСТЕННЫХ ОБЕЧАЕК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АМГ6 И М40

Е. Г. ТЕРНОВОЙ, инж., А. А. БОНДАРЕВ, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты исследований по электронно-лучевой сварке полуфабрикатов из алюминиевых сплавов АМГ6 и М40 толщиной 40...90 мм. Выбраны оптимальные режимы сварки, изучены свойства, микроструктурные особенности и твердость полученных соединений для горизонтальных и вертикальных швов. Разработана технология электронно-лучевой сварки при изготовлении крупногабаритных толстостенных обечаек из алюминиевых сплавов, прошедшая промышленную проверку.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, алюминиевые сплавы, обечайки, продольные и кольцевые соединения, режимы сварки, свойства соединений, твердость, микроструктура, промышленная проверка

Сопоставление технологических возможностей известных способов сварки плавлением показало, что наиболее перспективной при изготовлении крупногабаритных обечаек из алюминиевых сплавов больших толщин является электронно-лучевая сварка (ЭЛС) [1, 2]. Для получения необходимых свойств соединений при ЭЛС следует задавать оптимальные параметры режима, размеры и геометрию зоны проплавления, размеры зоны разупрочнения и др. [3–9].

При ЭЛС сплавов АМГ6 и М40 возможно снижение содержания элементов с высокой упругостью пара в металле шва, что приводит к снижению прочностных характеристик, образованию пористости и трещин в металле шва и околошовной зоне [10–14]. При этом авторы работ [1, 2, 5, 9] рекомендуют горизонтальное расположение электронного пучка, что способствует значительному снижению дефектов в металле шва.

Целью данной работы является разработка и промышленная проверка технологии ЭЛС кольцевых и продольных стыков обечаек из алюминиевых сплавов АМГ6 и М40 толщиной 40...90 мм, обеспечивающей заданные размеры зоны проплавления, формирование двухстороннего валика усиления и высокие свойства соединений по всей толщине стыка.

При выборе параметров режима, уровня заглубления фокального пятна и рабочего расстояния для максимального проплавления выполняли сварку образцов из сплавов АМГ6 и М40 с сквозным проплавлением без сканирования пучка. Длина образцов составляла 500 мм, толщина — 40 мм. Образцы сваривали от источника питания ЭЛА 60/60 на установке УЛ-179 при остаточном давлении в камере $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Скорость сварки устанавливали на всех режимах постоянной, рав-

ной 36 м/ч. Исходя из проведенных экспериментов было выбрано рабочее расстояние 220 мм при заглублении фокального пятна от -10 до $+20$ мм.

Оптимизацию режимов сварки со сквозным проплавлением проводили на плитах из сплава АМГ6 размером $500 \times 200 \times 40$ мм при скорости 18...85 м/ч пучком без отклонений и сканирующим пучком горизонтальных и вертикальных швов на подъем. Ток пучка в зависимости от скорости сварки варьировали в пределах 130...275 мА.

При сварке образцов стыковых соединений применяли технологические круговую и поперечную развертки, а также дискретные развертки с регулируемым временем задержки пучка в точках его остановок [15, 16]. Траектории разверток выбирали в виде различных кривых второго порядка (круг, полукруг, эллипс, полуэллипс) и их комбинации с продольным или поперечным скани-

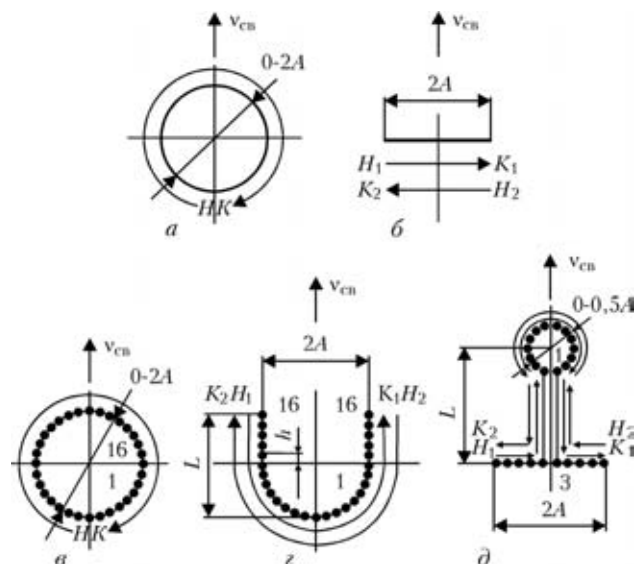


Рис. 1. Формы и траектории разверток, применяемых при сварке образцов из алюминиевых сплавов: а, б — круговое и поперечное непрерывное сканирование; в–д — дискретное сканирование (A — амплитуда развертки; h — шаг дискретного перемещения; 1, 16 и 3 — области переднего и заднего фронтов сварочной ванны с соответствующим (1 — минимальное, 16 — максимальное) тепловложением



Т а б л и ц а 1. Режимы сварки горизонтальным пучком вертикальных на подъем и горизонтальных швов плит из сплавов АМг6 и М40

Номер опыта	Сплав	Пространственное положение сварки стыка	Толщина плит, мм	Ток пучка, мА	Ток фокусировки, мА	Скорость сварки, м/ч	Макрошлиф
1	АМг6	Горизонтальное	40	220	865	30	
2		Вертикальное на подъем	60	275	895	20	
3		» »	90	330	915	12	
4*		Горизонтальное	90	330	915	12	
5*	М40	Вертикальное на подъем	40	395	870	45	
8		Горизонтальное	40	395	870	45	
9		Вертикальное на подъем	50	365	822	25	
10		» »	50	465	902	30	
11		» »	50	365	870	36	
12		» »	50	495	902	45	
13		Горизонтальное	65	630	915	36	

* Сварка сканирующим пучком с круговой разверткой.

рованием (рис. 1), а форму и параметры контролировали осциллографом С1-83. Независимо от вида развертки или соотношения времени задержек пучка по траектории сканирования амплитуду развертки поперек стыка стремились выдержать неизменной при сварке одной толщины при всех технологических вариантах и во всех пространственных положениях соединений (рис. 2). Режимы сварки стыковых соединений сплавов АМг6 и М40 и их макрошлифы приведены в табл. 1.

Оценку качества сварных соединений выполняли 100%-м контролем плотности соединений методом рентгеноскопии; измерением геометрических размеров зоны проплавления и зоны термического влияния (ЗТВ) на поперечных макрошлифах; определением состава металла шва по основному легирующему составляющим методом локального спектрального анализа; исследованием микроструктуры различных участков сварных соединений и распределением твердости; опре-

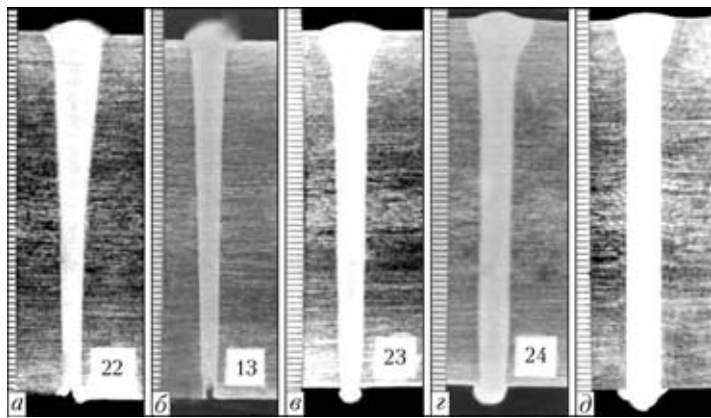


Рис. 2. Макрошлифы стыковых соединений сплава АМг6 толщиной 60 мм, полученных с помощью разверток: *а, б* — соответственно непрерывное круговое и поперечное сканирование; *в* — дискретное круговое сканирование; *г* — дискретное U-образное сканирование; *д* — дискретное комбинированное сканирование (круг с поперечной разверткой); *а, г* — сварка горизонтальным пучком на вертикальной плоскости; *б, в, д* — сварка горизонтальным пучком на подъеме

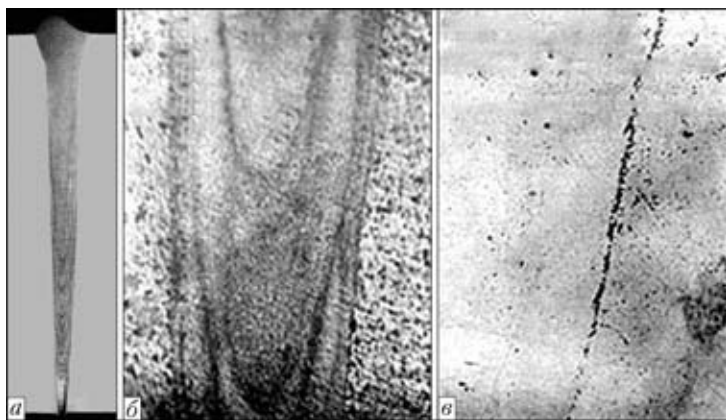


Рис. 3. Слоистая структурная неоднородность в сварном шве сплава АМг6 толщиной 90 мм, выполненном ЭЛС с круговой разверткой: *а* — макрошлиф соединения; *б* — макроструктура ($\times 20$) соединения в нижней части шва; *в* — микроструктура ($\times 300$) шва на участке вторичных фазовых выделений

делением прочностных характеристик соединений и их разбросом по толщине заготовок.

Рентгеновский контроль соединений не выявил грубых дефектов в виде пор, трещин, непроваров или пустот в сварных швах.

При выполнении горизонтальных швов на плите из сплава АМг6 наблюдается ярко выраженная структурная неоднородность по сечению шва, особенно в его нижней части (рис. 3). Наличие практически непрерывной цепочки вторичных фазовых выделений по слоям кристаллизации (рис. 3, *в*) приводит к значительной анизотропии свойств по сечению стыка и большому разбросу их значений в пределах одной партии испытуемых образцов. При выполнении вертикальных соединений на подъем плит из сплава М40 возможны дефекты в виде несплавленных полостей ближе к корню шва, а также микродефекты в металле ЗТВ в виде легкоплавких межзеренных прослоек, скоагулированных включений и подплавленных

эвтектических фаз, способствующих образованию отдельных микропор и рыхлот, приводящих к снижению ударной вязкости по границе сплавления. При этом коэффициент прочности снижается до уровня $0,85\sigma_{\text{в}}$ основного металла (ОМ).

Обработка и анализ результатов оценки соединений из сплавов АМг6 и М40 с параллельными границами зоны проплавления свидетельствуют, что в этом случае достигается стабильное формирование швов по всей глубине независимо от толщины полуфабрикатов при ширине швов 5...8 мм и двухстороннем формировании валиков усиления (макрошлифы в табл. 1). Кроме того, в ходе механических испытаний соединений установлены их высокие свойства, а металлографические исследования металла шва и ЗТВ показали, что при данном способе измельчаются и стабилизируются размеры зерен в верхней, средней и корневой частях металла шва, снижается содержание водорода и толщина выделений в межзеренных прослойках, уменьшаются размеры ЗТВ.

Химические составы ОМ и металла шва полученных соединений из сплавов АМг6 (толщиной 40, 60 и 90 мм) и М40 (40, 50 и 65 мм) оказались идентичными для всех толщин. Так, сплав АМг6 содержит (мас. %): 6,65...6,75 Mg; 0,55...0,59 Mn; основа Al, а сплав М40 — 5,0 Cu; 3,60...3,70 Mg; 0,43 Mn; основа Al. При этом потери магния на испарение в металле шва не превышали 0,02...0,04 %.

Результаты механических испытаний полученных сварных соединений сплавов АМг6 и М40 для всех толщин свидетельствуют (табл. 2, 3) о том, что соединения отличаются высокой стабильностью показателей временного сопротивления и ударной вязкости, а неоднородность свойств по всей толщине стыка практически отсутствует. Что особенно важно, так это то, что ударная вязкость соединений с надрезом Шарпи по середине шва на 15...20 % выше чем у ОМ и сохраняется практически на том же уровне при выполнении надреза на границе сплавления.

Анализ микроструктуры соединений из сплава АМг6, выявленной реактивом Келлера, показал, что, помимо α -твердого раствора магния и марганца, в алюминии присутствуют двойные и более сложные фазы, расположенные в виде тонких, иногда непрерывных цепочек по границам зерен в ОМ и между ветвями дендритов в металле шва (рис. 4). В нижней части соединений вследствие более высоких скоростей кристаллизации образуются центральные дендриты, более разветвлен-



Таблица 2. Механические свойства ОМ и сварных соединений плит из сплава АМг6, выполненных ЭЛС

Номер образца	Толщина ОМ и стыка, мм	σ_v , МПа	KCV, Дж/см ²		Объект испытания
			надрез по середине шва	надрез по границе шва	
1	40	$\frac{350...355}{360}$	$\frac{22...25}{23}$	—	ОМ, верхняя часть
2*		$\frac{262...309}{280}$	$\frac{20...21}{20}$	$\frac{12...15}{14}$	Стыковое соединение, дефекты в виде свищей
3*		$\frac{313...324}{324}$	$\frac{23...26}{25}$	$\frac{15...17}{16}$	Стыковое соединение, слоистая неоднородность
4		$\frac{345...350}{348}$	$\frac{27...29}{28}$	$\frac{18...22}{20}$	Стыковое соединение
5	60	$\frac{346...352}{350}$	$\frac{18...19}{18}$	—	ОМ
6		$\frac{335...340}{340}$	$\frac{25...27}{27}$	$\frac{18...22}{21}$	Стыковое соединение
7	90	$\frac{342...354}{350}$	$\frac{18...19}{19}$	—	ОМ
8		$\frac{335...338}{336}$	$\frac{22...25}{23}$	$\frac{17...19}{19}$	Стыковое соединение

* Сварка круговым сканирующим пучком.

ные по сравнению со структурой верхней части стыка. Дефекты в зоне сплавления, за исключением единичных микропор, отсутствуют.

При измерении твердости сварных соединений из сплава АМг6 толщиной 90 мм на приборе «Роквелл» шариком 1 мм при нагрузке 600 Н на трех уровнях по сечению стыка не было установлено заметного уменьшения твердости ОМ (*HRB* 82...84) вплоть до границы сплавления. В верхней части стыка твердость металла шва составляет *HRB* 80 и незначительно увеличивается до *HRB* 82...83 в средней части шва, а ближе к обратному валику твердость снижается до *HRB* 79...80 (рис. 5). Выбор оптимальных режимов сварки стыковых соединений для сплава М40 выполняли на плитах толщиной 50 мм при скоростях 25, 30,

36 и 45 м/ч (см. табл. 1). Результаты измерения твердости показаны на рис. 6. Из рисунка видно, что снижение скорости сварки от 45 до 25 м/ч приводит к увеличению ЗТВ (с 9 до 13 мм на одну сторону, включая шов), но практически не меняет твердости металла шва на всех уровнях замеров. Кроме того, с помощью термообработки (искусственное старение) можно повысить твердость металла шва. Влияние скорости сварки на микроструктуру шва и околошовной зоны показало, что снижение скорости сварки укрупняет структуру шва и эвтектических прослоек в металле ЗТВ, хотя структура шва остается достаточно мелкодисперсной и равноосной. Изучено влияние скорости сварки на рекристаллизацию ОМ. Металлографический анализ показал, что

Таблица 3. Механические свойства ОМ и сварных соединений плит из сплава М40, выполненных ЭЛС

Номер образца	Толщина ОМ и стыка, мм	σ_v , МПа	KCV, Дж/см ²		Объект испытания
			надрез по середине шва	надрез по границе шва	
1	40	$\frac{400...415}{400}$	$\frac{9,7...11,0}{10,8}$	—	ОМ
2*		$\frac{313...322}{320}$	$\frac{3...6}{5}$	$\frac{5,0...5,6}{5,0}$	Стыковое соединение
3		$\frac{388...392}{390}$	$\frac{5,1...6,2}{5,3}$	$\frac{6,8...7,2}{7,0}$	» »
4	50	$\frac{410...420}{415}$	$\frac{9,8...11,5}{10,5}$	—	ОМ
5		$\frac{365...375}{370}$	$\frac{7,6...8,5}{7,9}$	$\frac{6,9...7,8}{7,1}$	Стыковое соединение

* Сварка круговым сканирующим пучком.

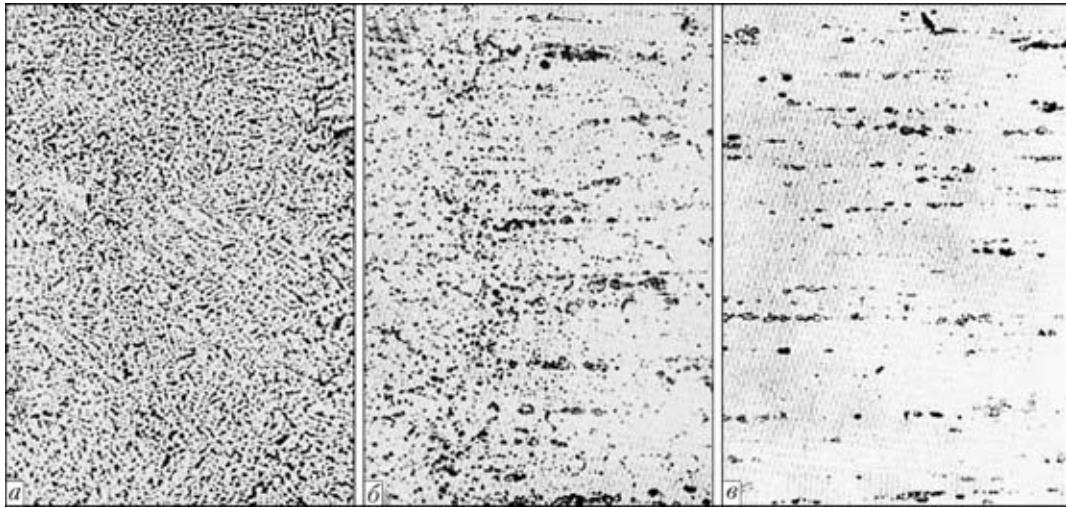


Рис. 4. Микроструктура ($\times 160$) характерных участков сварного соединения сплава АМг6 толщиной 40 мм: а — металл шва; б — зона сплавления; в — ОМ

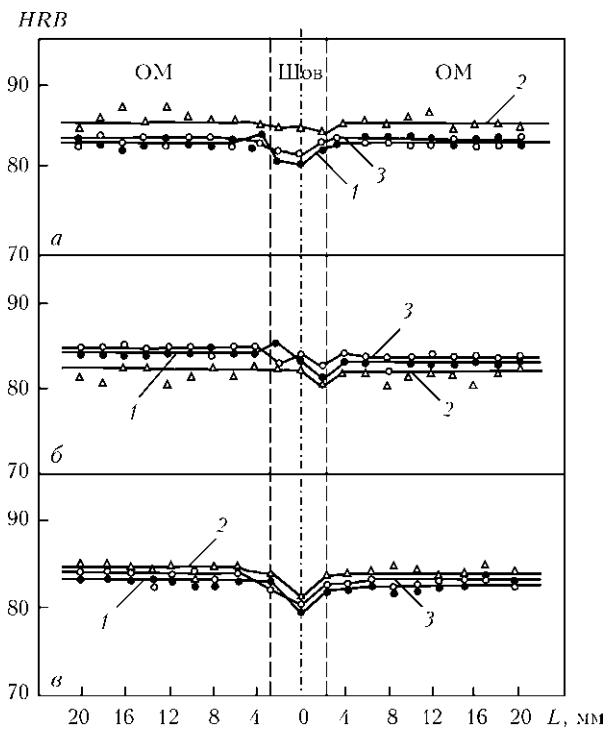


Рис. 5. Распределение твердости поперек сварных соединений сплава АМг6 толщиной 90 мм (прокат), выполненных ЭЛС: а-в — уровни замеров твердости на расстоянии от поверхности плиты со стороны ввода пучка 10, 45, 80 мм соответственно; 1 — непрерывная круговая развертка (стык); 2, 3 — дискретное сканирование (2 — проплав; 3 — стык)

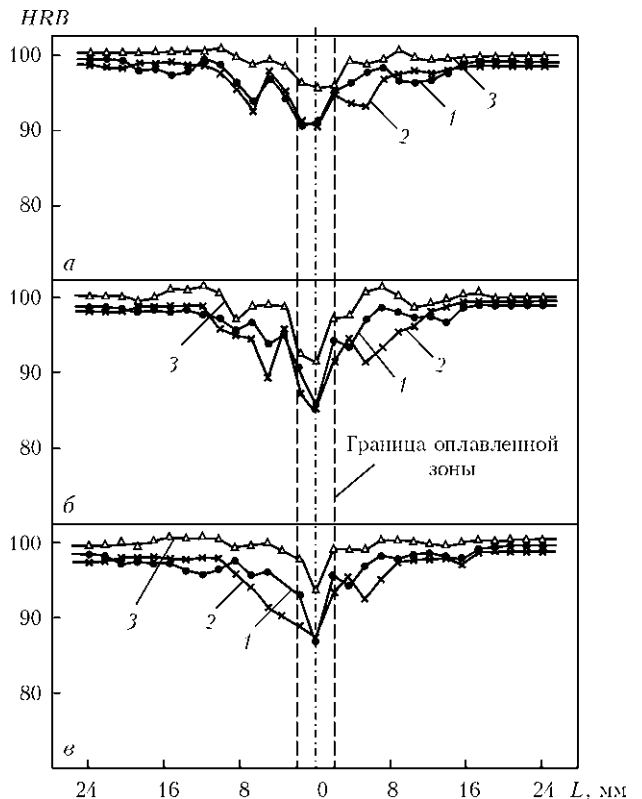


Рис. 6. Распределение твердости в сварных соединениях сплава М40 толщиной 50 мм, выполненных ЭЛС: 1-3 — то же, что и на рис. 5

участок рекристаллизации ОМ при сварке на скорости 25 м/ч не превышает 4 мм. Микроструктура шва и околошовной зоны для стыкового соединения из сплава М40 толщиной 50 мм, полученного на скорости 45 м/ч, приведена на рис. 7. Как видно, снижение скорости сварки до 25 м/ч не влияет на изменение состава металла шва. Однако при этом наблюдается разупрочнение по границе сплавления и снижение ударной вязкости в два раза по сравнению с ОМ. Повышение скорости до 45 м/ч и искусственное старение свар-

ных соединений позволили повысить ударную вязкость в ЗТВ до 20 % по сравнению со скоростью 25 м/ч.

В результате проведенных работ по ЭЛС полуфабрикатов из алюминиевых сплавов АМг6 и М40 была разработана и проведена промышленная проверка технологии сварки обечаек с кольцевыми и продольными соединениями толщиной 40, 50, 60, 65 и 90 мм на ПО «Стрела» (г. Оренбург). На рис. 8 показана обечайка с наружным диаметром 1250 мм, высотой 1500 мм и толщиной

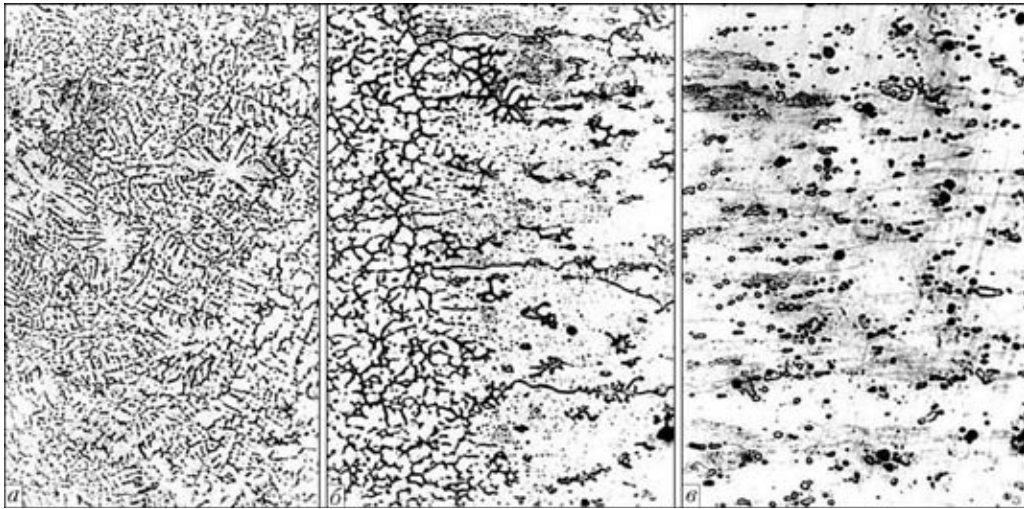


Рис. 7. Микроструктуры ($\times 160$) различных участков сварного соединения сплава М40 толщиной 50 мм: *а* — металл шва; *б* — зона сплавления; *в* — ОМ

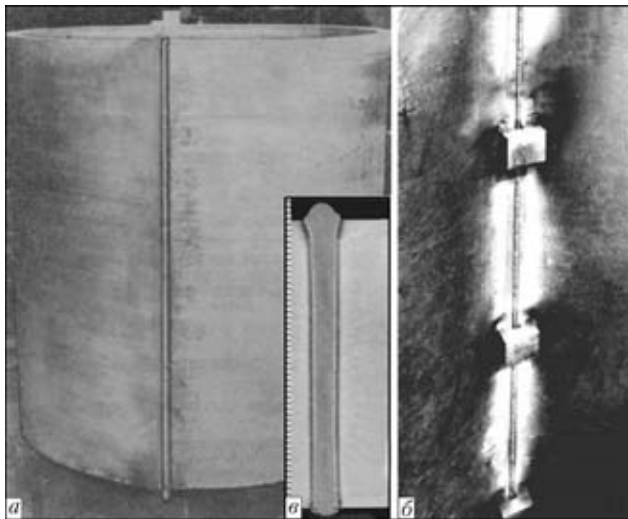


Рис. 8. Внешний вид сварной обечайки из сплава М40 (*а*), обратного валика продольного шва (*б*) и микрошлиф соединения (*в*)

стенки 50 мм из листового проката сплава М40 с продольным стыковым соединением, выполненным ЭЛС, а на рис. 9 — обечайка с внутренним диаметром 800 мм, высотой 1700 мм и толщиной стенок 40, 60 и 90 мм с кольцевыми стыковыми соединениями из поволоки сплава АМгб.



Рис. 9. Внешний вид сварной обечайки с переменной толщиной стенки из поволоки сплава АМгб (*а*) и макрошлиф соединения (*б*)

1. *Бондарев А. А.* ЭЛС, ее преимущества и основные положения при разработке технологии сварки алюминиевых сплавов // Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Докл. I Всесоюз. конф. по сварке легких, цветных и тугоплавких металлов и сплавов (Киев, 21–23 нояб. 1978 г.). — Киев: Наук. думка, 1980. — С. 106–110.
2. *Бондарев А. А.* Состояние техники и преимущества процесса электроннолучевой сварки конструкций из алюминиевых сплавов // Сварка алюминиевых сплавов криогенного и общего назначения: Докл. материалов советско-американского семинара (Ташкент, 17 окт. 1982 г.). — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 10–19.
3. *Свойства* сварных соединений алюминиевых и магниевых сплавов большой толщины, выполненных ЭЛС / Н. А. Ольшанский, А. С. Хохловский, Р. Ф. Балаян и др. // Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Докл. II Всесоюз. конф. по сварке легких, цветных и ту-

- гоплавких металлов и сплавов (Ташкент, 17 окт. 1982 г.). — Киев: Наук. думка, 1985. — С. 164–166.
4. *Писарский В. И.* ЭЛС алюминиевых сплавов больших толщин // V Всесоюз. конф. по ЭЛС (Киев, 17–29 окт. 1975 г.). — Киев: Наук. думка, 1977. — С. 168–171.
5. *Технология* ЭЛС крупногабаритных конструкций из сплава АМгб / А. А. Бондарев, Н. Г. Третьяк, О. С. Кузьменок и др. // Автомат. сварка. — 1978. — № 9. — С. 54–56.
6. *Бондарев А. А., Третьяк Н. Г.* Влияние параметров режима на размеры зоны проплавления и свойства соединения при сварке плит из сплава 1201 электронным лучом // Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Докл. I Всесоюз. конф. по сварке легких, цветных и тугоплавких металлов и сплавов (Киев, 21–23 нояб. 1978 г.). — Киев: Наук. думка, 1980. — С. 114–117.
7. *Электроннолучевая* сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.



8. Хохловский А. С., Яхонтов С. А. Влияние гидродинамических процессов в канале проплавления на качество сварных соединений при ЭЛС легких сплавов // Тр. Моск. энергет. ин-та. — 1980. — № 475. — С. 9–21.
9. Разработка технологии ЭЛС корпусов изделий из сплава АМг6 / Н. М. Воропай, А. А. Бондарев, Н. П. Иванов и др. // Свароч. пр-во. — 1972. — № 3. — С. 18–20.
10. ЭЛС сферических емкостей из алюминиевых сплавов / А. А. Бондарев, Н. М. Воропай, Д. М. Рабкин и др. // Автомат. сварка. — 1972. — № 5. — С. 44–47.
11. Зайцев В. И., Скороспелов В. В. Опыт изготовления сварных емкостей из жаропрочного алюминиевого сплава М40 // Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Докл. I Всесоюз. конф. по сварке легких, цветных и тугоплавких металлов и сплавов (Киев, 21–23 нояб. 1978 г.). — Киев: Наук. думка, 1980. — С. 76–81.
12. Свариваемость алюминиевого сплава М40 / А. Я. Ищенко, В. Г. Игнатъев, А. Г. Чаюн и др. // Автомат. сварка. — 1979. — № 10. — С. 15–18.
13. Бондарев А. А., Рабкин Д. М. Испарение легколетучих элементов при ЭЛС алюминиевых сплавов // Там же. — 1974. — № 3. — С. 13–16.
14. Децик Н. Н. Особенности испарения легирующих элементов шва при ЭЛС в промежуточном вакууме // Электротехн. пром-сть. Сер. Электросварка. — 1980. — Вып. 4. — С. 1–4.
15. Бондарев А. А., Скрябинский В. В. Сварка алюминиевых сплавов с программированием распределения плотности мощности электронного пучка по пятну нагрева // Автоматическое управление технологическим процессом электронно-лучевой сварки: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1987. — С. 52–58.
16. Система управления разверткой пучка при электронно-лучевой сварке / Ю. Н. Ланкин, А. А. Бондарев, Е. И. Довгодько, В. А. Дьяченко // Автомат. сварка. — 2009. — № 9. — С. 16–20.

Results of investigations on electron beam welding of 40..90 mm thick semi-finished products of aluminium alloys АМг6 and М40 are given. Optimal welding parameters were selected. Properties, microstructural peculiarities and hardness of the resulting joints were studied for horizontal and vertical welds. The commercial EBW technology was developed and verified in fabrication of large-size thick-walled shells of the above alloys.

Поступила в редакцию 23.09.2011

ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВАЯ НАПЛАВКА КОМПОЗИЦИОННЫХ СПЛАВОВ НА БАЗЕ СФЕРИЧЕСКОГО РЕЛИТА

Известно, что для наплавки деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, наиболее эффективно применение сплавов на основе литых карбидов вольфрама (далее релит). Несмотря на высокую стоимость они часто незаменимы, особенно в горнодобывающей отрасли. Композиционные сплавы успешно применяют для наплавки таких деталей, как замки буровых труб, шарошки буровых долот, зубья дробилок и др. Однако наплавка таких сплавов является сложной технической задачей и сегодня, кроме печного способа, разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона еще в 60-е годы прошлого столетия, другие технологии практически не применяют в странах СНГ. За рубежом для наплавки деталей горнодобывающего оборудования широко используют плазменно-порошковую наплавку, а в качестве матрицы — мягкие легкоплавкие самофлюсующиеся сплавы на основе никеля системы Ni–Si–В. Для этого используют специальные смеси порошков с соотношением матричного и армирующего порошков примерно 50% на 50% по массе. К сожалению, из-за сепарации порошков по удельному весу при наплавке наблюдается неравномерное распределение частиц релита в наплавленном слое, что приводит к нарушению формирования и появлению дефектов в виде пор, трещин и т. д.

ООО фирма «Плазма-Мастер Лтд» (г. Киев) разработала технологию и оборудование для плазменно-порошковой наплавки с отдельной подачей матричного и армирующего порошков. Подача порошков осуществляется с двух отдельных питателей, а смешивание происходит либо на входе либо непосредственно в самом плазмотроне (в зависимости от его конструкции). Управление питателями в рамках общего сварочного цикла производится контроллером PLC либо системой с ЧПУ (CNC). Это позволяет обеспечить равномерное распределение релита в наплавленном слое и легко регулировать соотношение матричного и армирующего порошков в нем. Последнее очень важно для деталей, в которых необходимо обрабатывать наплавленный слой для обеспечения определенного размера, например, деталей центробежных секционных насосов (см. 2-ю с. обложки). Поскольку заполнение наплаваемого металла релитом происходит снизу, то можно подобрать такое соотношение порошков, при котором припуск на механическую обработку будет состоять из одного матричного сплава, что существенно облегчает эту операцию.

Компоновка оборудования и конструкции плазмотронов позволяют наплавливать как внутренние, так и наружные поверхности.

Кроме никелевых сплавов, в качестве матричного материала перспективно использовать и специальные сплавы на основе железа. Опыт наплавки таких композиций показал, что они прекрасно формируются, более износостойкие и значительно дешевле.