

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТОЛСТОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СПЛАВОВ МАГНИЯ

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, А. А. БОНДАРЕВ

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

В ближайшем будущем при строительстве космических платформ и других крупногабаритных толстостенных конструкций перспективно применение легких магниевых сплавов. Поэтому исследования по их совершенствованию и оценке принципиальной возможности получения качественных сварных соединений являются актуальными. В данной работе изложены результаты экспериментальных исследований свариваемости электронным лучом магниевого сплава МА2 толщиной 100 мм и отработки технологии изготовления крупногабаритных конструкций из этого сплава. Предложены варианты подготовки и обработки поверхности свариваемых кромок и прилегающих к шву участков основного металла перед сваркой. По результатам проплавления металла на всю толщину плиты и проведения металлографических исследований особенностей формирования швов установлен оптимальный режим сварки по ускоряющему напряжению, току пучка, току фокусировки, параметрам сканирования, заглублению фокального пятна и пространственному положению стыка. Разработана техническая документация и изготовлен в металле сборочно-сварочный стенд для сборки под электронно-лучевую сварку заготовок плит размером 3000×3000×100 мм. Для предупреждения образования дефектов внешнего формирования соединений предложено использовать накладки с лицевой стороны стыка и подкладки со стороны корня шва, которые располагаются по всей длине стыка и изготавливаются из того же сплава. Их следует приклеплять к свариваемому изделию на прихватках, выполняемых аргонодуговой сваркой, уже после сборки на стенде. С учетом результатов проведенных исследований была изготовлена конструкция плиты размером 3000×3000×100 мм из магниевого сплава МА2 с использованием электронно-лучевой сварки. Библиогр. 5, табл. 3, рис. 6.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электронно-лучевая сварка, магниевые сплавы, большие толщины, крупногабаритные конструкции, катоды сварочных пушек, оптимальные параметры сварки, коэффициент прочности соединений, ультразвуковой контроль

В настоящее время среди множества металлических конструкционных материалов широко применяют легкие цветные металлы, к которым относятся и магниевые сплавы. Главными отраслями их применения являются самолето- и ракетостроение, а также космическое аппаратостроение, где снижение весовых характеристик изделий имеет определяющее значение [1, 2].

Более широкому использованию магниевых сплавов при создании конструкций больших размеров будет способствовать развитие надежных методов получения неразъемных соединений посредством сварки. Решение этой проблемы лежит как в сфере совершенствования металлургии производства собственно магниевых сплавов различных систем легирования, так и проведения исследований в направлении разработки технологии их сварки различными методами. В настоящей работе приведены результаты исследований по оценке принципиальной возможности использования магниевого сплава МА2 применительно к производству крупногабаритных толстостенных конструкций для будущих космических платформ.

Первые эксперименты по отработке технологии электронно-лучевой сварки (ЭЛС) сплава МА2 показали наличие большого парогозаво-

го потока из сварочной ванны. Когда этот поток попадает в катодное пространство, он приводит к повышению давления и возникновению электрических пробоев в пушке. Поэтому необходимо увеличивать либо мощность системы откачки катодного блока пушки, что не всегда можно реализовать на действующих установках, либо рабочее расстояние между пушкой и изделием. В наших экспериментах рабочее расстояние устанавливалось равным 320 мм.

Негативное влияние парогозавого потока сказывается и на состоянии поверхности катода. Алюминий и его оксиды, попадая на поверхность лантанборидных катодов, образуют эвтектики, которые снижают эмиссию электронов. Ток пучка изменяется, что нарушает геометрию проплавления. Особенно это проявляется при сварке швов большой протяженности, характерных для соединений заготовок космических платформ.

По этой причине в последнее время все большее применение находят металлические катоды с рабочей температурой около 2800 °С, благодаря которым происходит испарение металлических частиц с поверхности катодов и предотвращение металлизации катодов. Основные трудности использования высокотемпературных металлических катодов связаны с большой мощностью нагрева катода и стойкостью изоляторов и всех

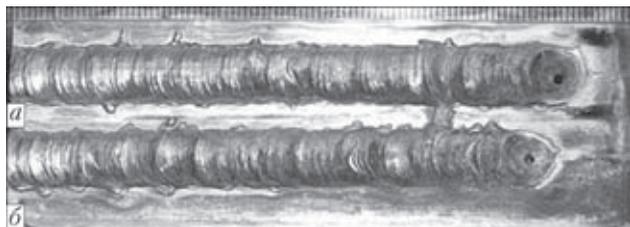


Рис. 1. Формирование верхних валиков швов при ЭЛС сплава МА2: а, б — см. в тексте

элементов катодного узла при высоких температурах. Для снижения мощности подогрева катодов в ИЭС им. Е. О. Патона была разработана новая конструкция крепления вольфрамового катода, изготавливаемая с помощью лазерного луча [3]. Новая конструкция вольфрамовых катодов диаметром 3 мм позволяет получать электронный пучок с током 500 мА при мощности подогрева 70 Вт. При использовании вольфрамовых катодов диаметром 4,2 мм ток пучка 1000 мА достигается при мощности нагрева 100 Вт. Эти катоды, использованные нами в исследованиях, показали высокую стабильность формирования протяженных швов при ЭЛС магниевых сплавов большой толщины.

Устойчивость формирования сварных соединений на магниевых сплавах обеспечивается также стабильностью работы всего энергетического комплекса установки. Даже незначительная неравномерность перемещения свариваемых заготовок сплава МА2 негативно сказывается на форме швов.

При нестабильности скорости сварки более 5 % на верхнем валике швов четко прослеживается появление наплывов (рис. 1, а), а в корне — повышение амплитуды колебания глубины проплавления. При нестабильности скорости сварки менее 3 % неравномерность формирования швов уменьшается (рис. 1, б).

Необходимые параметры системы перемещения пушки и изделия были достигнуты с помощью установки для ЭЛС, оснащенной линейными модулями МКК35 (фирма «Rexroth», Германия). На рис. 2 приведен механизм перемещения пушки установки УЛ 219, который использовали при отработке технологии сварки сплава МА2. Он обеспечивал достаточную точность перемещения (0,08 мм) и удовлетворял требованиям по нестабильности скорости сварки.

Механизм имеет три степени свободы по осям: $X-X$ (1), $Y-Y$ (2) и $Z-Z$ (3). Перемещение электронно-лучевой пушки вдоль камеры по оси $X-X$ осуществляется путем выкатывания столов линейных модулей МКК35-165 длиной 3800 мм, которые снабжены приводом, состоящим из двух шариковинтовых передач с шагом 5 мм, двух зубчатых ременных передач с передаточными числами $i = 2$ и электродвигателя с крутящим моментом 5 Н·м.

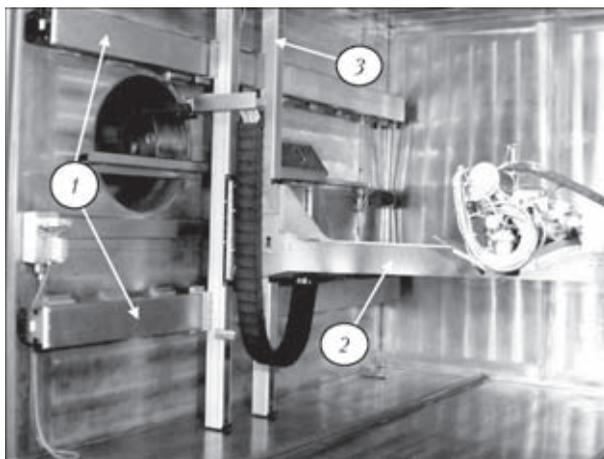


Рис. 2. Механизм перемещения пушки по координатам $X-X$ (1), $Y-Y$ (2) и $Z-Z$ (3)

На столах линейных модулей МКК35-165 установлены два линейных модуля МКК25-110 длиной 2830 мм, снабженные приводом, который состоит из одной шариковинтовой передачи с шагом 5 мм, одной зубчатой ременной передачи с передаточным числом $i = 3,6$ и электродвигателя с крутящим моментом 5 Н·м. Эти модули позволяют перемещать электронно-лучевую пушку по оси $Z-Z$.

В свою очередь на столах линейных модулей МКК25-110 длиной 2830 мм установлена балка с линейными модулями МКК15-60 длиной 2200 мм, снабженными приводом, который состоит из одной шариковинтовой передачи с шагом 5 мм, одной зубчатой ременной передачи с передаточным числом $i = 3$ и электродвигателя с крутящим моментом 0,83 Н·м. Эти модули позволяют перемещать пушки по оси $Y-Y$.

Скорость перемещения электронно-лучевой пушки по осям $X-X$, $Y-Y$ и $Z-Z$ устанавливается в пределах 6...120 м/ч (1,66...33,30 мм/с).

Для контроля и точного позиционирования все электродвигатели снабжены датчиками угловых перемещений. Сигналы от датчиков используются для управления параметрами ЭЛС с помощью компьютерной системы на базе высокоточных CNC и PLC. Используется визуальный метод проектирования программ ЭЛС [4]. Дополнительно к традиционно применяемому вычислительному комплексу, объединяющему в своем составе CNC и PLC, в установке УЛ 209 введены более высокий уровень интерфейса оператора для визуального проектирования рабочих программ и контроля процесса сварки, а также дополнительный компьютер, который независимо от других процессорных узлов решает задачи распознавания стыка по получаемому от аппаратуры наблюдения РАСТР изображению поверхности изделия, одновременно с главным компьютером он обеспечивает выполнение функций автоматического

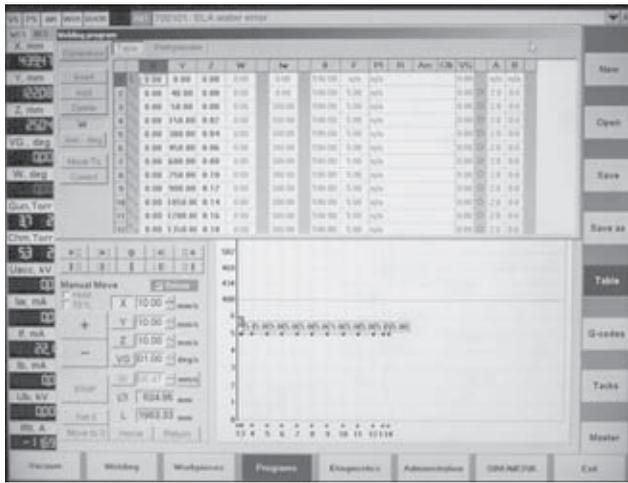


Рис. 3. Пример визуального программирования параметров сварки стыкового соединения из сплава МА2

обучения, корректировки и слежения за стыком. Спроектированная визуально программа сварки при запуске ее на выполнение автоматически, без участия оператора, конвертируется в последовательность G-кодов, исполняемую CNC. Пример такой программы, используемой для ЭЛС стыков из магниевого сплава МА2 длиной 1500 мм, приведен на рис. 3.

Отработку технологии ЭЛС толстостенных магниевых сплавов осуществляли в два этапа. На первом были проведены эксперименты по оптимизации параметров режима сварки для устойчивого формирования соединений при полном отсутствии каких-либо дефектов сварных швов. На этих стыковых соединениях были определены прочностные характеристики на образцах, вырезанных в различных направлениях по толщине стыков [5]. На втором этапе разработаны и изготовлены сборочно-сварочные стенды, проведены их испытания, а затем с их использованием выполнена сварка и изготовлены крупногабаритные конструкции для опытного производства.

На рис. 4 приведен эскиз сварной плиты космической платформы из магниевого сплава МА2, которая сваривается из четырех заготовок размером 1500×1500 мм при толщине 105 мм. На этом

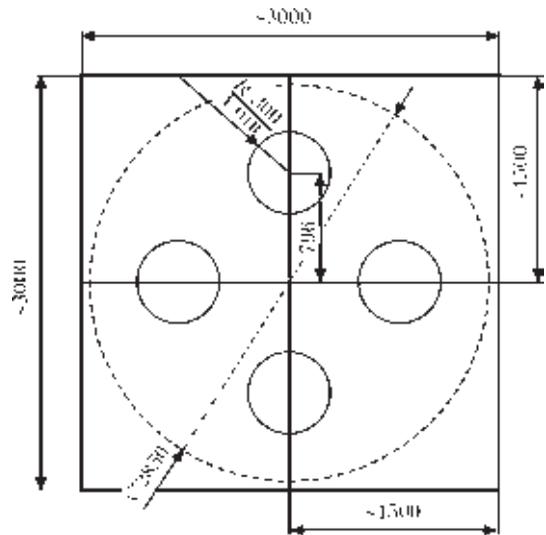


Рис. 4. Эскиз конструкции плиты из магниевого сплава МА2 (штрихпунктирная — диаметр заготовки, вырезаемой после сварки)

же эскизе показаны четыре отверстия диаметром 600 мм, которые вырезаются после сварки.

В табл. 1 и 2 приведены химический состав и механические свойства исходных заготовок толщиной 100 и 105 мм, которые подвергали сварке, а после оптимизации параметров режима сварки их использовали для проведения механических испытаний.

При оценке влияния параметров режима сварки на качество формирования швов выполняли проплав по основному металлу, после чего изготавливали макрошлифы и определяли наличие или отсутствие дефектов в сварных швах и зоне термического влияния.

Стабильное качество формирования соединений достигается при выполнении сварки горизонтальным пучком горизонтальных швов на вертикальной плоскости при мощности пучка 16 кВт и скорости сварки 5 мм/с.

На рис. 5, а приведен макрошлиф поперечного сечения получаемых швов при ЭЛС горизонтальным пучком. Все сварные соединения характеризуются наличием подрезов со стороны входа пуч-

Таблица 1. Химический состав полуфабрикатов (плита) разных партий магниевого сплава МА2, мас. %

№ п/п	Толщина плиты, мм	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni
1	105	3,35...3,57	0,47...0,51	0,34...0,42	0,0042...0,0048	0,0023...0,0042	0,001...0,0033	0,0003...0,00052
2	100	3,5...3,8	0,60...0,68	0,10...0,20	0,020...0,022	0,14...0,18	0,000	0,000

Таблица 2. Механические свойства основного металла полуфабрикатов сплава МА2 при испытании образцов, вырезанных в различных направлениях по сечению плиты

№ п/п	Толщина плиты, мм	σ_b , МПа			$\sigma_{0,2}$, МПа			δ , %		
		вдоль	поперек	по высоте	вдоль	поперек	по высоте	вдоль	поперек	по высоте
1	105	255...260	249...261	246...269	186...197	190...192	74,3...82,0	14...16	9,1...17	11...13
2	100	237,2... ...250,8	227,2... ...248,1	270,9... ...277,5	133,9... ...144,6	131,1... ...139,8	60,7... ...61,3	9,4... ...21,0	9,2... ...19,2	18,2... ...18,3

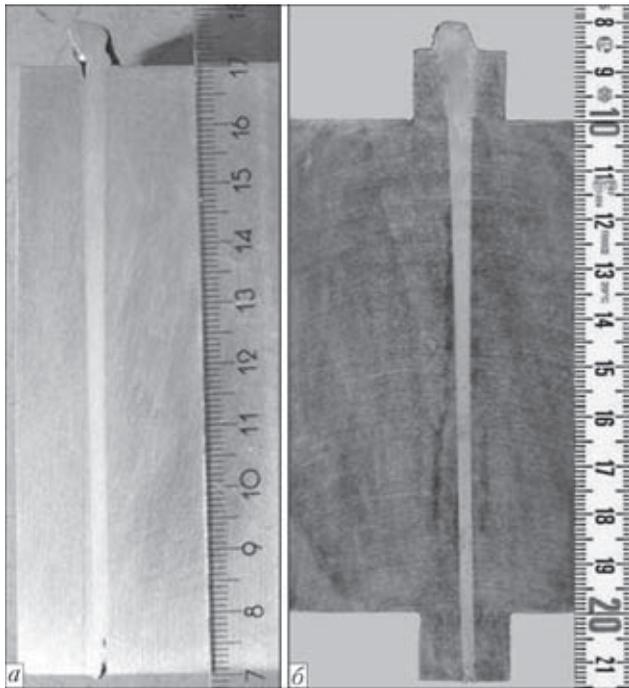


Рис. 5. Поперечные шлифы сварных соединений сплава МА2: а, б — см. в тексте

ка и накладок, которые устанавливаются сверху и в корне стыка (рис. 5, б) и закрепляются перед аргонодуговой сваркой. Толщина накладок и подкладок составляла 15 мм. С учетом возрастания общей глубины проплавления ток сварки был также увеличен до 380 мА. Скорость сварки, ток фокусирующей линзы $I_{\phi} = 590$ мА, ускоряющее напряжение $U = 60$ кВ и технологическая развертка пучка по окружности диаметром 2 мм оставались неизменными.

Во всех случаях поверхность свариваемых кромок, а также прилегающие к стыку поверхности плит шабрили на глубину 0,1...0,2 мм. При сварке заготовок размером 1500×1500×100 мм прихватки стыков выполняли на режиме: $I_{п} = 100$ мА, $I_{\phi} = 620$ мА, $v_{св} = 5$ мм/с; колебания пучка по кругу диаметром 2 мм. На длине стыка 1500 мм выполняли пять прихваток длиной 120 мм с шагом между прихватками 150 мм. Перед наложением прихваток стык обезгаживался расфокуси-

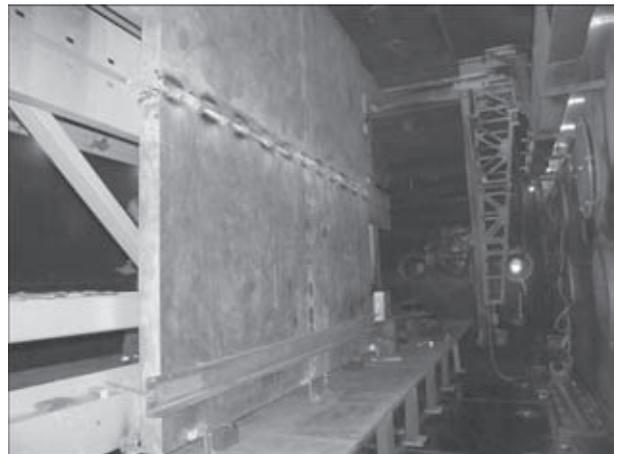


Рис. 6. Общий вид платформы из сплава МА2 перед выполнением сварки последнего шва длиной 3000 мм

рованным электронным пучком малой мощности. Прихватки накладывали в шахматном порядке, начиная с середины длины стыка. После чего осуществляли механическую зачистку их поверхности, установку и фиксирование накладки сверху стыка и подкладки со стороны корня. С двух боков стыка устанавливали и прикрепляли вводную и выводную планки. В таком состоянии сваривали стыки длиной 1500 мм.

После завершения сварки плиты размером 3000×1500×105 мм снимали со сварочного стенда и угловой шлифмашиной обрезали накладки с лицевой стороны плит, а также корневые и вводно-выводные планки в начале и конце швов.

ЭЛС последнего стыка длиной 3000 мм выполняли на специальном сборочно-сварочном стенде. Прихватки стыка закрепляли электронным пучком с двух сторон с переворотом изделия вне вакуумной камеры. Последующую зачистку прихваток и крепление накладок и выводных планок проводили по приведенной выше технологии. Общий вид оснащенной и установленной в вакуумной камере платформы приведен на рис. 6.

После сварки собранного по такой схеме стыка стол выкатывается из камеры, сварной узел с помощью крана транспортируется на участок ультразвукового контроля и замеров остаточной деформации.

Таблица 3. Прочностные характеристики сварных соединений сплава МА2

№ п/п	Место вырезки образцов	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Коэффициент прочности
1	Вдоль проката	$\frac{231,2...240,5}{235,2}$	$\frac{132,9...141,0}{136,6}$	14,5	0,97
2	Поперек проката	$\frac{229,7...283,8}{232,0}$	$\frac{131,6...138,9}{135,8}$	16,2	0,96
3	По толщине плиты	$\frac{258,2...260,4}{259,3}$	$\frac{72,4...81,7}{76,9}$	11,5	0,94

Одновременно с подготовленной и собранной на стенде плитой в вакуумную камеру загружали образцы-свидетели, необходимые для последующего изготовления шлифов, предназначенных для металлографических исследований, определения распределения твердости в металле шва и зоне термического влияния, а также и для изготовления и проведения испытаний механических свойств.

Круглые образцы для определения временного сопротивления на разрыв изготавливали из различных участков как по толщине стыка, так и в различных направлениях прокатки плит при их металлургическом производстве. Результаты испытаний образцов приведены в табл. 3. Сравнив эти данные с характеристиками основного металла, приведенными в табл. 2, можно сделать вывод, что коэффициент прочности соединений во всех случаях превышает значение 0,9, которое требовалось обеспечить в соответствии с техническим заданием.

Контроль качества сварных швов после освобождения плит из сборочно-сварочного стенда осуществляли с применением ультразвукового дефектоскопа УД2-70. При этом плита располагалась на ложементе в горизонтальном положении таким образом, чтобы сварной шов был на весу. Сканирование выполняли с обеих сторон шва. Проведенный ультразвуковой контроль качества стыковых сварных соединений с толщиной кромок 100 мм не выявил каких-либо дефектов на общей длине швов 6000 мм.

Оценка уровня деформации плиты по схеме замеров стрелы прогиба показала, что после выполнения завершающего шва деформация пластины колеблется в пределах $\pm 1,5$ мм.

Выводы

1. Показана принципиальная возможность применения ЭЛС при создании толстостенных сварных конструкций из магниевых сплавов.

2. Установлены оптимальные параметры режима и основные технологические требования при ЭЛС заготовок из магниевого сплава МА2 с толщиной кромок 100 мм.

3. Разработана и прошла опытно-промышленную проверку технология изготовления крупногабаритных изделий размером $3000 \times 3000 \times 100$ мм из магниевого сплава МА2.

1. *Магниевые сплавы: Справочник*. В 2 т. – М.: Металлургия, 1978. – Т. 1: Металловедение магния и его сплавов / Под ред. М. Б. Альтмана, А. Ф. Белова, В. И. Добаткина и др. – 1978. – 232 с. – Т. 2: Технология производства и свойства отливок и деформированных полуфабрикатов / Под ред. И. И. Гурьева, М. В. Чухрова. – 296 с.
2. *Ольшанский Н. А., Хохловский А. С.* Свойства сварных соединений алюминиевых и магниевых сплавов большой толщины, выполненных ЭЛС // Актуальные проблемы сварки цветных металлов. – Киев: Наук. думка, 1985. – С. 167–169.
3. *Назаренко О. К., Матвейчук В. А.* Влияние нарушений аксиальной симметрии сварочной пушки на положение фокусного пятна // Автомат. сварка. – 2012. – № 7. – С. 47–51.
4. *Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия / Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, В. М. Нестеренков и др.* // Там же. – 2004. – № 5. – С. 3–7.
5. *Бондарев А. А., Нестеренков В. М.* Исследование свариваемости магниевого сплава МА2 электронным лучом в вакууме // Компрессорное машиностроение. – 2013. – № 2. – С. 21–28.

Поступила в редакцию 10.11.2013

Экспо Силезия ♦ Институт сварки в Гливицах

Международная специализированная выставка

ExpoWELDING 2014

12–16 октября 2014

Centrum Targowo-Wystawiennicze
Expo Silesia (Сосновец, Польша)

Организатор: Expo Silesia Sp. z o.o.

На ежегодной международной сварочной выставке будут представлены новые технологии, применяющиеся в наиболее развитых регионах Польши.

В рамках выставки состоится 56-я научно-техническая конференция «Сварка – всегда больше», организатор Институт сварки в Гливицах.

В выставке ExpoWELDING 2013 приняли участие 140 компаний из Польши, Германии, Чехии, Канады, Китая, Франции, Австрии, Тайваня, Италии, Дании, Швеции, Нидерландов и Швейцарии, ее посетили около 4500 специалистов.

Контакты: Тел.: +4832 78 87 506, факс: +4832 78 87 525

E-mail: wioletta.blonska@exposilesia.pl