

УДК 621.791.7

**В. М. НЕСТЕРЕНКОВ<sup>1</sup>, Ю. А. МАРЧЕНКО<sup>2</sup>, П. Д. ЖЕМАНИЮК<sup>2</sup>,  
И. А. ПЕТРИК<sup>2</sup>, Ю. А. АРХАНГЕЛЬСКИЙ<sup>1</sup>, А. Л. МАЙСТРЕНКО<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина*

<sup>2</sup> *АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина*

<sup>3</sup> *Институт сверхтвердых материалов им. В. М. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина*

## ОТРАБОТКА ГИБРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СОЕДИНЕНИЯ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ТРЕНИЯ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

*Рассмотрена последовательность выполнения работ по отработке гибридной технологии соединения магниевых сплавов методом трением с перемешиванием и электронно-лучевой сваркой. Исследования проводились на образцах из магниевых сплавов марки МА2-1 и МЛ10. С целью поиска режимов бездефектного формирования соединений были выполнены опытные сварки образцов прошедших предварительную обработку методом трения с перемешиванием, а также без нее. Установлено, что вследствие предварительной обработки трением с перемешиванием свариваемых кромок, размер зерна литейного магниевых сплава МЛ10 в зоне обработки уменьшается в 8-10 раз, что обеспечивает возможность применения электронно-лучевой сварки для бездефектного соединения изделий из магниевых сплавов.*

**Ключевые слова:** *литейные магниевые сплавы, электронно-лучевая сварка, трение с перемешиванием, сварной шов, измельченная структура, трещины, оптимальные режимы сварки, дефекты формирования, прочность, балл зерна, повышение качества сварных швов*

### Введение

По сравнению с известными способами сварки плавлением электроннолучевая сварка характеризуется высокой удельной концентрацией энергии, идеальными условиями вакуумной защиты расплавленного металла, высокой скоростью сварки, низкими значениями погонной энергии, небольшой шириной ЗТВ, узкой зоной проплавления и малым объемом сварочной ванны, незначительными деформациями свариваемых деталей, высокой гибкостью и большим диапазоном технологических возможностей [1].

При выборе режимов ЭЛС обычно исходят из необходимости формирования шва требуемой геометрии (ширина шва, глубина проплавления, коэффициент формы шва) и получения необходимых служебных свойств металла сварного соединения. Возможность формирования под воздействием электронного пучка «кинжальной» формы шва с минимальной металлоемкостью ванны вступает в противоречие с достижением стабильных эксплуатационных параметров сварного соединения как для одного, так и для многих швов. Нарушение оптимального режима ЭЛС зачастую ведет к появлению в швах дефектов, причем даже на хорошо свариваемых материалах.

Ряд дефектов в швах на металлах толщиной  $\delta \geq 10$  мм классифицируются как дефекты форми-

рования. Они встречаются при любых способах сварки плавлением и хорошо известны: непровары, подрезы, провисание шва, а также повышенное разбрызгивание. Однако возникают и другие, специфические, дефекты: корневые дефекты, протяженные полости в объеме шва, трещины и отклонение шва от стыка из-за остаточных или наведенных магнитных полей.

При сварке плавлением магниевых сплавов происходят структурные превращения в металле шва и околошовной зоне. Такие участки приобретают разные механические свойства и вследствие этого прочность сварного соединения в сравнении с основным металлом уменьшается до 50-60%, а по линии сплавления и в околошовной зоне могут возникать трещины [2].

### 1. Экспериментальная часть

С целью поиска режимов бездефектного формирования швов в процессе работы были выполнены сквозные проплавления по сплошному металлу по схеме в нижнем положении (вертикальный электронный пучок) без выводной планки и без подкладки, когда пушка перемещается в вертикальной плоскости Z-X или Z-Y. Сварка выполнялась на образцах размером 150x100x5,5 мм,

которые предварительно прошли обработку трением с перемешиванием [3] и механическую обработку обеих сторон заготовки. Как показано на поперечном макрошлифе сварного соединения магниевого сплава МА2-1 (рис. 1), образование дефектов в виде подрезов, занижений, а также трещин в ЗТВ не выявлено.



Рис. 1. Макроструктура сварного соединения магниевого сплава МА2-1 толщиной  $\delta_m = 5,5$  мм при сварке в нижнем положении

Выполняли также сквозные проплавления по схеме в нижнем положении на весу без подкладки на образцах из литейного магниевого сплава МЛ10 толщиной  $\delta_m = 8$  мм с применением технологической развертки электронного пучка по эллипсу. Сварку выполняли на образцах размером  $150 \times 100 \times 8$  мм, прошедших предварительную обработку методом трения с перемешиванием. Как показано на поперечном макрошлифе сварного соединения магниевого сплава МЛ10 (рис. 2), по бокам лицевого валика шва (переход на основной металл) образуются плавные занижения глубиной до 0,2 мм, а в корне шва – провисание высотой 0,6 мм. Дефектов литой зоны и ЗТВ не обнаружено.



Рис. 2. Макроструктура сварного соединения магниевого сплава МЛ10 толщиной  $\delta_m = 8$  мм при сварке в нижнем положении

Сварку литейного магниевого сплава МЛ10 толщиной  $\delta_m = 6$  мм, также выполняли горизонтальным электронным пучком по схемам «снизу-вверх» и «сверху-вниз», без выводных планок. Образцы размером  $150 \times 100 \times 6$  мм предварительно прошли обработку методом трения с перемешиванием. Анализ проведенных экспериментов показал, что вертикальные швы, выполненные горизонтальным электронным пучком, формируются удовлетворительно по обеим схемам. Как показано на рис. 3 и рис. 4, ширина шва в корневой части по обеим схемам растет с увеличением тока сварки  $I_p = 35 - 40$  А. Дефектов в виде подрезов, занижений и трещин в литой зоне, по линии сплавления и ЗТВ не выявлено.

Таким образом установлено, что на магниевых сплавах МА и МЛ, при использовании гибридной технологии трения с перемешиванием и электронно-лучевой сварки, (в т.ч. включая применение схемы сварки вертикальным электронным пучком «в нижнем положении» и горизонтальным электронным пучком «снизу-вверх» и «сверху-вниз», со сквозным проплавлением металла) получено удовлетворительное формирование сварных соединений без металлургических дефектов, за счет измельчения структуры сплава в зоне сварки. Данная возможность обеспечивается при толщинах образцов до  $\delta_m \leq 10$  мм.



Рис. 3. Макроструктура сварного соединения магниевого сплава МЛ10 толщиной  $\delta_m = 6$  мм при сварке по схеме снизу-вверх  
а -  $I_p = 35$  А; б -  $I_p = 40$  А



Рис. 4. Макроструктура сварного соединения магниевого сплава МЛ10 толщиной  $\delta_m = 6$  мм при сварке по схеме сверху-вниз  
а -  $I_p = 35$  А; б -  $I_p = 40$  А

При переходе на сварку образцов магниевых сплавов МА и МЛ толщиной более  $\delta_m > 10$  мм появляется необходимость применения выводных планок из-за образования в корневой части шва подрезов и занижений, которые имеют место на всех рассмотренных схемах при сквозном проплавлении. Переход к варианту несквозного проплавления в случае с выводной планкой исключает подрезы и занижения в корне шва, а устранение корневых дефектов достигается применением технологических разверток электронного пучка оптимальной амплитуды, частоты и закона колебаний.

Гибридная технология трения с перемешиванием и электронно-лучевой сварки была опробована также при сварке магниевого сплава МЛ10 толщиной  $\delta_m = 20$  мм по схеме вертикальным электронным пучком в нижнем положении на технологической подкладке. Свариваемые поверхности образцов предварительно обрабатывали методом трения с

перемешиванием на глубину до 5 мм. После обработки трением с перемешиванием поверхности свариваемых кромок подвергали механической обработке с чистотой не хуже 0,02 мм. Формирование сварных соединений исследовали в зависимости от положения фокуса электронного пучка относительно поверхности образца. Как показано на рис. 5 и рис. 6. В таком случае, геометрия проплавления не изменяется в исследуемом диапазоне фокусировки и имеет по глубине практически параллельные стенки (линии сплавления с основным материалом).

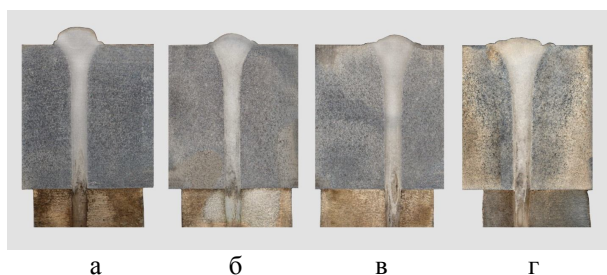


Рис. 5. Макроструктура сварных соединений магниевого сплава МЛ10 толщиной  $\delta_m = 20$  мм



Рис. 6. Макроструктура сварного соединения магниевого сплава МЛ10 толщиной  $\delta_m = 18,5$  мм:  
а - без обработки методом FSW;  
б - с обработкой методом FSW

## 2. Анализ полученных результатов

Проведенные исследования по отработке гибридной технологии сварки магниевых сплавов МА и МЛ в диапазоне толщин  $\delta_m = 5-30$  мм, показали стабильность формирования сварных соединений, качество лицевой и корневой частей шва и отсутствие трещин в расплаве по линии сплавления и ЗТВ в диапазоне скоростей сварки  $V_{св} = 15-30$  мм/с.

Установлено, что после обработки поверхностей образцов легких сплавов методом трения с перемешиванием происходит уплотнение основного металла, устраняется направленная ориентация зерен, уменьшается на порядок размер зерна. Как показано на рис. 7, после проведения по таким поверхностям ЭЛС размер зерна в сварном шве увеличивается приблизительно в 2 раза.

Таким образом, можно утверждать, что применение гибридной технологии позволит существенно

повысить конструктивную прочность изделий авиационного и космического назначения.

Проведенные исследования распределения легирующих элементов в сварных соединениях легких сплавов, полученных по гибридной технологии, показали, что для магниевого сплава МА2-1 [4] имеют место потери легирующих элементов при испарении, а именно Al до 1,8%, Zn до 12% (рис. 8). Приведенные данные по потерям легирующих элементов в сварном соединении магниевого сплава МА2-1, которые при обычной технологии ЭЛС приводят к ухудшению механических характеристик, при использовании гибридной технологии трения с перемешиванием и электронно-лучевой сварки, компенсируются мелкодисперсной структурой.

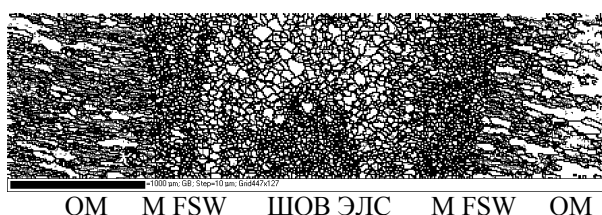


Рис. 7. Изменение размера зерна при переходе от основного металла к металлу после FSW, а затем к металлу сварного шва (ОМ- основной металл МА2, М FSW – металл после обработки методом FSW, ШОВ ЭЛС – металл электронно-лучевого шва)

## Заключение

Таким образом, по результатам выполненной работы:

1. Установлены оптимальные режимы электроннолучевой сварки магниевого сплава МЛ10 толщиной в диапазоне  $\delta_m = 8-10$  мм, обеспечивающие заданную геометрию проплавления в различных пространственных положениях.

2. Установлено, что главным параметром электроннолучевой сварки магниевых сплавов МА и МЛ является скорость сварки, которая должна выполняться на наиболее возможных значениях при соответствующем увеличении сварочного тока.

3. Формирование стабильного бездефектного валика шва и параллельных стенок проплавления сварных соединений магниевых сплавов МА и МЛ достигается путем фокусировки электронного пучка над поверхностью образцов и применением колебаний пучка по эллиптическому закону, причем оптимальным является отношение продольных колебаний к поперечным как 3:1, а частота колебаний 300 и 500 Гц.

4. Исследования механических свойств сварных соединений магниевых сплавов МА2 и МЛ10 показали, что в случае применения гибридной тех-

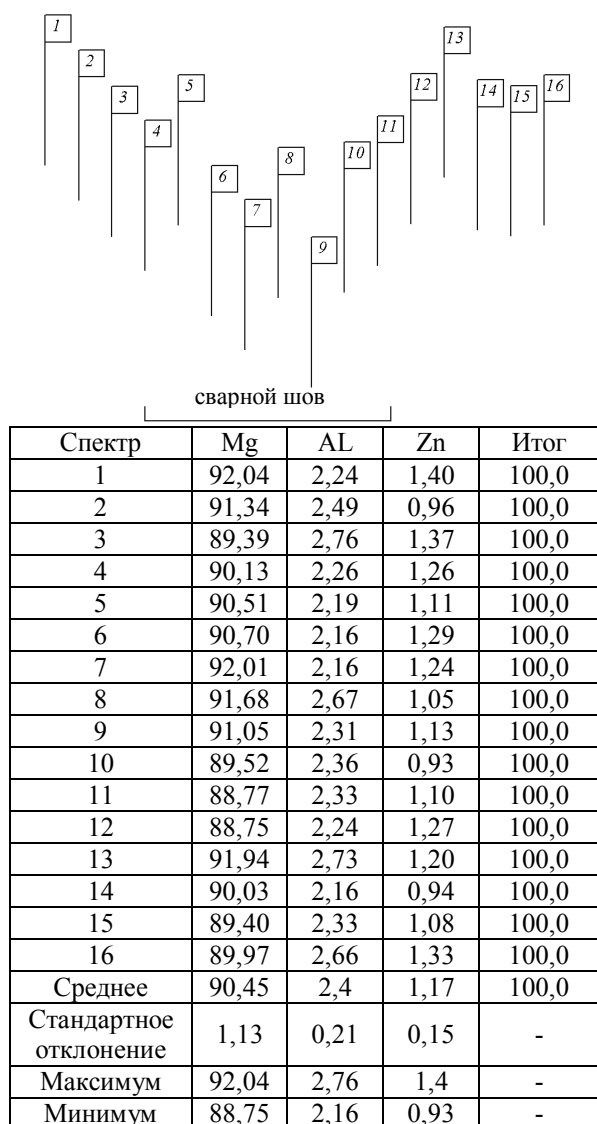


Рис. 8. Распределение легирующих элементов в сварном соединении магниевого сплава МА2-1, полученного по гибридной технологии трения с перемешиванием и электронно-лучевой сварки

нологии трения с перемешиванием и электронно-лучевой сварки, коэффициент прочности соединений для магниевых сплавов составляет не менее 0,94 временного сопротивления основного металла.

5. Установлено, что вследствие обработки трением с перемешиванием размер зерна литейного магниевого сплава МЛ10 в зоне обработки уменьшается в 8-10 раз, что обеспечивает возможность применения электронно-лучевой сварки для соединения изделий из указанных сплавов.

## Литература

1. Электронно-лучевая сварка [Текст] / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко [и др.]. – К. : Наук. думка, 1987. – 256 с.
2. Макаров, В. И. Сварка магниевых сплавов [Текст] / В. И. Макаров, Ю. Н. Скачков. – М. : Машиностроение, 1972. – 120 с.
3. Возможности модифицирования структуры легких сплавов трением с перемешиванием [Текст] / В. М. Нестеренков, А. Л. Майстренко, В. А. Лукаш [и др.] // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении : сб. Тр. Междунар. науч.-техн. конф. Одесса, 22-24 мая 2013 г. – Одесса, 2013. – С. 117-120.
4. Портной, К. И. Магниевого сплавы [Текст] / К. И. Портной, А. А. Лебедев. – М. : Metallurgizdat, 1952. – 736 с.

## References

1. Nazarenko, O. K., Kaidalov, A. A., Kovbasenko, S. N. *Elektronno-luchevaya svarka* [Elektron beam welding]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987. 256 p.
2. Makarov, V. I., Skachkov, Y. N. *Svarka magnievykh spлавov* [Welding of magnesium alloy]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 120 p.
3. Nesterenkov, V. M., Maistrenko, A. L., Lukash, V. A., *Vozmozhnosti modifitsirovaniya struktury legkikh spлавov treniem s peremeshivaniem* [Possibility of modifying the structure of light alloy friction stir], *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoj konferentsii «Novye i netraditsionnye tekhnologii v resurso- i energosberezhении»* [New and innovative technologies in resource- and energy saving. Proc. mezh. Scie.-Techn. Conf.]. Odessa, 2013, pp. 117-120.
4. Portnoi, K. I., Lebedev, A. A., *Magnievyye spлавy* [Magnesium alloy]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1952. 736 p.

Поступила в редакцию 12.04.2016, рассмотрена на редколлегии 15.06.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедры оборудования и технологии сварочного производства А. В. Овчинников, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

## ВІДПРАЦЮВАННЯ ГІБРИДНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ З'ЄДНАННЯ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ МЕТОДОМ ТЕРТЯ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ І ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ

*В. М. Нестеренков, Ю. А. Марченко, П. Д. Жеманюк, И. А. Петрик,  
Ю. О. Архангельский, А. Л. Майстренко*

Розглянута послідовність виконання робіт по відпрацюванню гібридної технології з'єднання магнієвих сплавів методом тертя з перемішуванням і електронно-променевого зварювання. Дослідження проводилися на зразках магнієвих сплавів марки МА2-1 та МЛ10. З метою пошуку режимів бездефектного формування з'єднань, були виконані дослідні зварювання зразків, які пройшли попередню обробку методом тертя з перемішуванням, а також без неї. Встановлено, що внаслідок попередньої обробки тертям з перемішуванням крайок, що зварюються, розмір зерна ливарного магнієвого сплаву МЛ10 в зоні обробки, зменшується у 8-10 разів, що забезпечує можливість застосування електронно-променевого зварювання для бездефектного з'єднання виробів з магнієвих сплавів.

**Ключові слова:** ливарні магнієві сплави, електронно-променеве зварювання, тертя з перемішуванням, зварний шов, подрібнена структура, тріщини, оптимальні режими зварювання, дефекти формування, міцність, бал зерна, підвищення якості зварних швів.

## PROVE-OUT FOR FRICTION STIR AND ELECTRON BEAM HYBRID WELDING OF MAGNESIUM ALLOYS

*V. M. Nesterenkov, Y. A. Marchenko, P. D. Zhemanyuk, I. A. Petrik,  
Yu. A. Arkhangelskiy, A. L. Maystrenko*

A work procedure on prove-out for friction stir and electron beam hybrid welding of magnesium alloys has been described. The research has been conducted on the specimens made of MA2-1 and МЛ10 magnesium alloys. For the purpose of selecting the defect-free weld formation conditions there have been made welding tests for the specimens, which have been preliminary subject to friction stir welding (FSW), as well as for those without FSW. It has been also established that owing to preliminary FSW the grain size of МЛ10 casting magnesium alloy is decreased 8 to 10 times in the weld area, which makes it possible to use electron beam welding for defect-free joining of magnesium alloy parts.

**Key words:** casting magnesium alloys, electron beam welding, friction stir, weld, refined structure, cracks, optimal welding conditions, formation defects, strength, grain grade, and weld quality improvement

**Нестеренков Владимир Михайлович** – д-р техн. наук, ст. науч. сотр., чл.-кор. НАН України, зав. отделом, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: nesterenkov@technobeam.com.ua

**Марченко Юрий Анатольевич** – вед. инж. по сварке АО «Мотор Сич», г. Запорожье, Украина, e-mail: marchenko2126@mail.ru

**Жеманюк Павел Дмитриевич** – канд. техн. наук, главный инженер АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: motor@motorsich.com.

**Петрик Игорь Андреевич** – канд. техн. наук, главный сварщик АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Архангельский Юрий Алексеевич** – мл. науч. сотр., Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина, e-mail: beamweld@ukr.net

**Майстренко Анатолий Львович** – д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН Украины, зав. отделом, Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля, Киев, Украина, e-mail: almaystrenko@voliacable.com.

**Nesterenkov Vladimir Mikhailovich** – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of Department, E. O. Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: nesterenkov@technobeam.com.ua.

**Marchenko Yuriy Anatolevich** – lead engineer on welding of JSC "Motor Sich", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: marchenko2126@mail.ru.

**Zhemanyuk Pavel Dmitrievich** – Ph.D., chief engineer of JSC "Motor Sich", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: motor@motorsich.com.

**Petrik Igor Andreevich** – Ph.D., chief welder of JSC "Motor Sich", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com

**Arkhangelskiy Yuri Alexeyevich** – Junior Researcher, Electric Welding Institute E. O. Paton NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: beamweld@ukr.net.

**Maystrenko Anatoly L'vovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of Department, Institute for Superhard Materials named after V. N. Bakul, Kiev, Ukraine, e-mail: almaystrenko@voliacable.com