



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-101-108>
УДК 621.791: 621.74

Поступила 02.10.2023
Received 02.10.2023

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ СПЛАВА АД1Н

К. В. НИКИТИН, С. С. ЖАТКИН, Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия, ул. Молодогвардейская, 244. E-mail: kvn-641@mail.ru
Д. Г. ЧЕРНИКОВ, А. К. СКОРОУМОВ, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева, г. Самара, Россия, Московское шоссе, 34
Д. А. ДУНАЕВ, Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия, ул. Молодогвардейская, 244
В. А. НОВИКОВ, Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, г. Самара, Россия, ул. Ново-Садовая, 221

В работе предложен и опробован экспериментально новый способ сварки алюминиевых сплавов с одновременной магнитно-импульсной обработкой (МИО) жидкого и кристаллизующегося металла сварочной ванны. Приводятся результаты исследований полуавтоматической сварки алюминиевого сплава АД1Н с МИО ванны расплава. Исследуется влияние режимов сварки и магнитно-импульсной обработки на структуру и физико-механические свойства зон сварки. Представлены данные исследований в диапазоне изменения энергии разряда от 250 до 500 Дж и числе импульсов 23–24. Результаты исследований показали, что воздействие импульсного магнитного поля с энергией разряда 350 и 500 Дж приводит к повышению твердости материала. Показано, что при сварке с одновременной МИО в данных режимах происходит измельчение структуры, а на границе с околошовной зоной – формирование текстурированной зоны с вытянутыми зернами.

Ключевые слова. Алюминиевые сплавы, сварка полуавтоматом, магнитно-импульсная обработка, твердость, микроструктура, режимы сварки.

Для цитирования. Никитин, К. В. Применение магнитно-импульсной обработки при электродуговой сварке сплава АД1Н / К. В. Никитин, С. С. Жаткин, Д. Г. Черников, А. К. Скороумов, Д. А. Дунаев, В. А. Новиков // *Литье и металлургия*. 2023. № 4. С. 101–108. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-101-108>.

APPLICATION OF MAGNETIC-PULSE TREATMENT IN ELECTRODE ARC WELDING OF AD1N ALLOY

K. V. NIKITIN, S. S. ZHATKIN, Samara State Technical University, Samara, Russia, 244, Molodogvardeyskaya Str. E-mail: kvn-641@mail.ru
D. G. CHERNIKOV, A. K. SKOROUMOV, Samara National Research University named after academician S. P. Korolev, Samara, Russia, 34, Moskovskoye Shosse
D. A. DUNAIEV, Samara State Technical University, Samara, Russia, 244, Molodogvardeyskaya Str.
V. A. NOVIKOV, Samara Branch of the Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia, 221, Novo-Sadovaya Str.

The paper proposes and experimentally tests a new method of welding aluminum alloys with simultaneous magnetic-pulse treatment (MPT) of the liquid and solidifying metal of the welding pool. The results of investigations on semi-automatic welding of AD1N aluminum alloy with MPT of the molten pool are presented. The influence of welding and magnetic-pulse treatment modes on the structure and physico-mechanical properties of the weld zones is investigated. The research data is presented in the range of discharge energy variation from 250 to 500 J and pulse numbers from 23–24. The results show that the influence of the pulsed magnetic field with discharge energy of 350 and 500 J leads to an increase in material hardness. It is shown that welding with simultaneous MPT in these modes results in structure refinement and the formation of a textured zone with elongated grains at the border with the heat-affected zone.

Keywords. Aluminum alloys, semi-automatic welding, magnetic-pulse treatment, hardness, microstructure, welding modes.

For citation. Nikitin K. V., Zhatkin S. S., Chernikov D. G., Skoroumov A. K., Dunaev D. A., Novikov V. A. Application of magnetic-pulse treatment in electrode arc welding of AD1N alloy. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 4, pp. 101–108. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-101-108>.

Введение

Свойства алюминиевых сплавов в достаточной степени удовлетворяют требованиям, предъявляемым к конструкциям из этих материалов. Однако анализ качества сварных соединений и конструкций показывает, что технологические и эксплуатационные свойства ниже соответствующих свойств основных материалов.

Наличие в отдельных зонах сварного шва направленных крупнокристаллических образований с грубыми выделениями избыточных фаз делают металл шва предрасположенным к снижению технологических и эксплуатационных характеристик. Измельчение зерна способствует повышению прочностных и пластических свойств материала, а достигаемое в этих условиях равномерное распределение интегральных фаз и оксидных включений сводит к минимуму склонность материала к образованию газовых несплошностей [1, 2].

Вопросы качества формируемого материала актуальны и для процессов электродуговой наплавки и выращивания деталей по WAAM-технологии. Алюминиевые сплавы являются одними из наиболее перспективных материалов для WAAM-технологии. Однако в процессе аддитивного производства заготовок из алюминиевых сплавов может возникнуть ряд проблем. В первую очередь это связано с формированием большого количества пор [3, 4], которые оказывают существенное негативное влияние на общие механические свойства алюминиевых деталей, приводя к резкому снижению пластичности и прочности [5].

В связи с этим в работе описывается предложенное техническое решение – исследование и разработка способа сварки алюминиевых сплавов с одновременным магнитно-импульсным воздействием на жидкий и кристаллизующийся металл сварочной ванны для интенсификации процессов перемешивания металла в ней и тем самым измельчения структуры. Магнитно-импульсная обработка (МИО) обеспечивает бесконтактный характер воздействия, высокую точность дозирования энергии разряда и возможность управления давлением импульсного магнитного поля на зону жидкого металла. Основанием для экспериментальных исследований послужил опыт работы в области магнитно-импульсной обработки расплавов [6–10].

Материалы и методика исследований

В качестве образцов использовали пластины размером 100×250 мм, толщиной 6 мм из алюминиевого сплава АД1Н (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав сплава АД1Н, %

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Mg	Zn
До 0,5	До 0,5	До 0,03	До 0,15	99,3	До 0,05	До 0,05	До 0,1

Для сварки образцов применяли проволоку сварочную алюминиевую диаметром 1,6 мм Св-АК5 (табл. 2).

Таблица 2. Химический состав присадочной проволоки Св-АК5, %

Fe	Si	Ti	Al	Cu	Примеси
До 0,6	4,5–6	0,1–0,2	93–95,4	До 0,2	Прочие, каждая 0,1; всего 1,1

Сварку проводили на работе Qigox Cloos 320, оснащенном сварочным полуавтоматом QINEO PULSE, одновременную магнитно-импульсную обработку (МИО) металла сварочной ванны – на магнитно-импульсной установке МИУ-1.

Разработанная технологическая схема сварки с одновременным магнитно-импульсным воздействием на металл сварочной ванны показана на рис. 1.

Расплавление металла в зоне 1 происходит в зоне сварочной дуги от сварочной горелки 7. При этом процесс сварки (при необходимости с подачей присадочной проволоки) происходит непрерывно за счет движения горелки относительно заготовки.

К сварочной горелке 7 примыкает индуктор 8, подключенный с помощью гибкого кабеля к магнитно-импульсной установке 9. Индуктор движется синхронно со сварочной горелкой.

Под сварочной горелкой металл расплавляется, а в зоне индуктора охлаждается и кристаллизуется. В этой зоне (зона кристаллизации) на индуктор с частотой не менее 1 Гц разряжается батарея конденсаторов МИУ. Возникающее вокруг индуктора магнитное поле наводит в кристаллизующемся металле

вихревые токи, которые распределены по глубине неравномерно: на поверхности максимальны, а в глубину убывают по экспоненциальному закону. Для реализации предлагаемого способа был спроектирован и изготовлен специальный одновитковый индуктор.

В результате воздействия импульсного магнитного поля (ИМП) в кристаллизующемся металле сварочной ванны за счет действия наводимых вихревых токов возникают внутренние дополнительные источники тепла. При этом действие интенсивных металлопотоков вследствие электродинамических сил приводит к дроблению зарождающихся зерен, увеличению центров кристаллизации и в конечном счете измельчению структуры как в самом шве, так и в околошовной зоне.

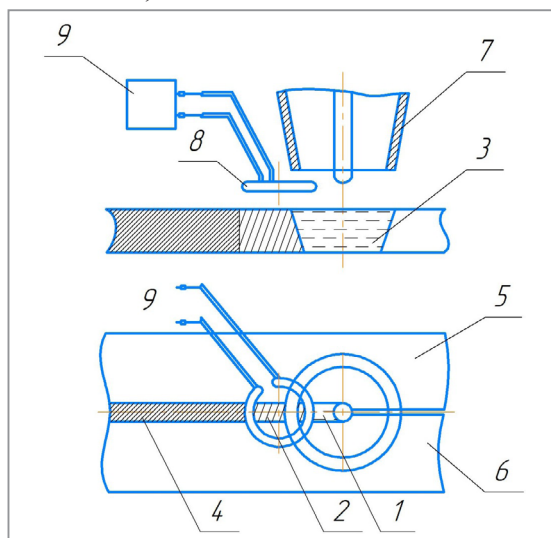


Рис. 1. Технологическая схема и схема индуктора:

- 1 – участок расплавления соединяемых деталей (зона дуги); 2 – участок затвердевания (кристаллизации);
3 – зона расплавленного металла; 4 – место полного затвердевания металла; 5, 6 – свариваемые детали;
7 – сварочная горелка; 8 – одновитковый индуктор; 9 – МИУ-1

В процессе МИО происходит интенсивное комплексное теплосиловое воздействие на кристаллизующийся расплав. Так, помимо силового воздействия, за счет электродинамических сил в расплаве ванны сварного шва возникают внутренние дополнительные источники тепла от действия наводимых вихревых токов.

Действие электродинамических сил может приводить к дроблению зарождающихся зерен, увеличению центров кристаллизации и в конечном счете измельчению и изменению структуры как в самом шве, так и в околошовной зоне.

Следует отметить, что в результате изменения направленности воздействия ИМП имеется возможность управления величиной и направлением тепломассопереноса [6].

Внешний вид данного экспериментального стенда, состоящего из роботизированного комплекса Qirox Cloos 320, МИУ-1 с блоком управления, индуктора с его держателем, представлен на рис. 2, а. На рис. 2, б показан узел экспериментального стенда, состоящий из сварочной головки и закрепленного на ней с помощью держателя индуктора, подключенного к МИУ-1.

В табл. 3 приведены режимы МИО при сварке плавлением.

Механические испытания полученных опытных образцов проводили на универсальной испытательной машине ИР 5082-100 по методике, соответствующей ГОСТ 1497-84. Микроструктуру зон сварки исследовали на микроскопе МЕТАМ 34ЛВ в программе СИАМС 800, а также на электронном микроскопе JSM-6390А фирмы JEOL.

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 3 показаны макрошлифы образцов, полученных после сварки с магнитно-импульсной обработкой.

На образце 1 (без МИО) наблюдается удовлетворительное формирование сварного шва, дефекты отсутствуют. Геометрические параметры сварного шва соответствуют требованиям. Шов выделен более темной областью. Околошовная зона на шлифе не выделяется, что свидетельствует об отсутствии излишнего нагрева, т.е. о корректном режиме сварки.



Рис. 2. Внешний вид экспериментального стенда (а) и индуктор, закрепленный на сварочной головке (б)

Таблица 3. Режимы МИО при сварке плавлением

Маркировка образца	Режим сварки	Режим МИО	
		энергия разряда W , Дж	количество импульсов разряда n , шт.
1	Сварочный ток – 191А;	–	–
2	напряжение – 21,7 В;	250	23
3	скорость подачи проволоки – 5,2 м/мин;	350	23
4	скорость сварки – 0,65 м/мин	500	24

Примечание: образец 1 – сварка без МИО.

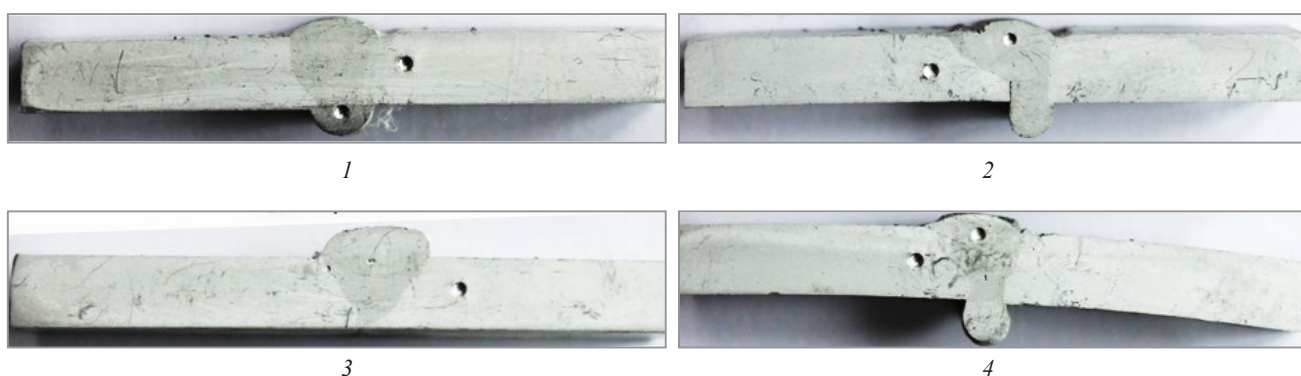


Рис. 3. Макрошлифы полученных образцов

У образца 2 наблюдаются непровар в «корне» сварного шва и подрезы на наружной поверхности валика. Несплавление кромок в корне с вытеканием жидкого металла связано со смещением сварочной дуги относительно оси стыка.

Структура шва на макрошлифах отчетливо выделяется более темной областью, что свидетельствует об изменении структуры в зоне сварного шва по сравнению с основным металлом за счет присадочного материала. Геометрические параметры сварных соединений образцов соответствуют требованиям.

Также на образцах 2 и 4 наблюдается значительное превышение допустимой выпуклости в «корне» шва. Микроструктура сварного шва для ряда режимов показана на рис. 4.

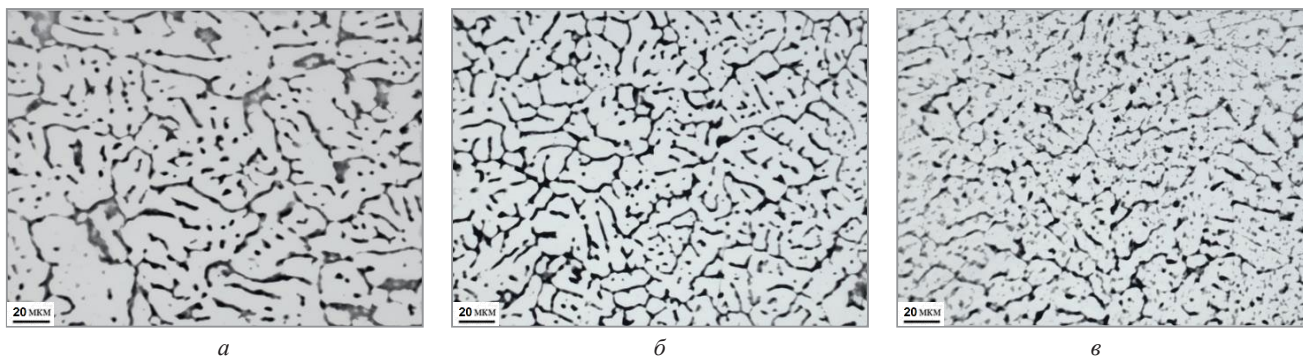


Рис. 4. Микроструктура сварного шва образцов: *a* – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 4

Структура сварного шва представлена в виде дендритов твердого раствора кремния в алюминии и эвтектики Al-Si в междендритном пространстве, характерная для доэвтектического сплава системы Al-Si при сварке присадочной проволокой Св-АК5. Хорошо видно, что при сварке с одновременной магнитно-импульсной обработкой формируется более дисперсная структура (рис. 4, *б*, *в*). За счет действия электродинамических сил, вызванных импульсным магнитным полем, происходит дробление зарождающихся зерен и измельчение структуры.

Более детальный анализ микроструктуры на электронном микроскопе показал, что после сварки с магнитно-импульсной обработкой наблюдается внутризеренное выделение частиц с размерами до 1–2 мкм, стимулированное пластической деформацией под воздействием МИО (рис. 5, *б*, *в*).

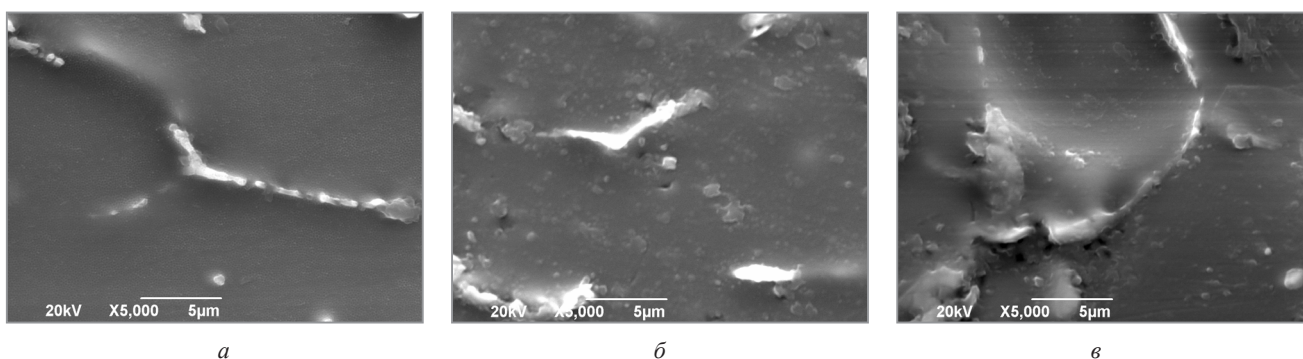


Рис. 5. Микроструктура сварного шва образцов без (*a*) и с магнитно-импульсной обработкой (*б*):
a – образец 1; *б* – образец 3; *в* – образец 4

Микроструктура границы сварного шва с околосшовной зоной (ОШЗ) показана на рис. 6.

В отличие от центральной зоны сварного шва (см. рис. 4) здесь формируется текстурированная зона с вытянутыми зёрнами из-за условий теплоотвода, а также за счет воздействия электродинамических сил. При сварке с МИО на высоких энергиях разряда 350 и 500 Дж (рис. 6, *в*, *з*) за счет интенсивной пластической деформации кристаллизующегося материала наблюдается более выраженная вытянутость зёрн по сравнению со сваркой без МИО и с энергией разряда 250 Дж (рис. 6, *а*, *б*). Это может быть связано с неоднородностью распределения импульсного магнитного поля при его воздействии на материал образца [11]. При осевой симметрии поля его минимальное значение достигается в центре кольцевого индуктора, расположенного параллельно поверхности свариваемых заготовок. Поэтому воздействие возникающих электродинамических сил будет неоднородным по величине и различаться в центре и на краях формируемой зоны сварного шва – в центре минимальное, а по краям максимальное. Максимальная напряженность магнитного поля используемой установки достигает до 10^7 А/м [12] и давление, оказываемое на поверхность образца, составит до 10^8 Па [11], что может быть сравнимо или выше предела текучести ряда сплавов алюминия [13]. Кроме того, в условиях повышенных температур предел текучести снижается, что приводит к пластической деформации в зоне МИО и формированию текстуры.

При сварке без МИО обнаруживаются микропоры (см. рис. 5, *а*), которые практически не наблюдались в режимах сварки с МИО (рис. 5, *в*, *з*).

На рис. 7 показана зависимость предела прочности и твердости сварного шва от режимов обработки.

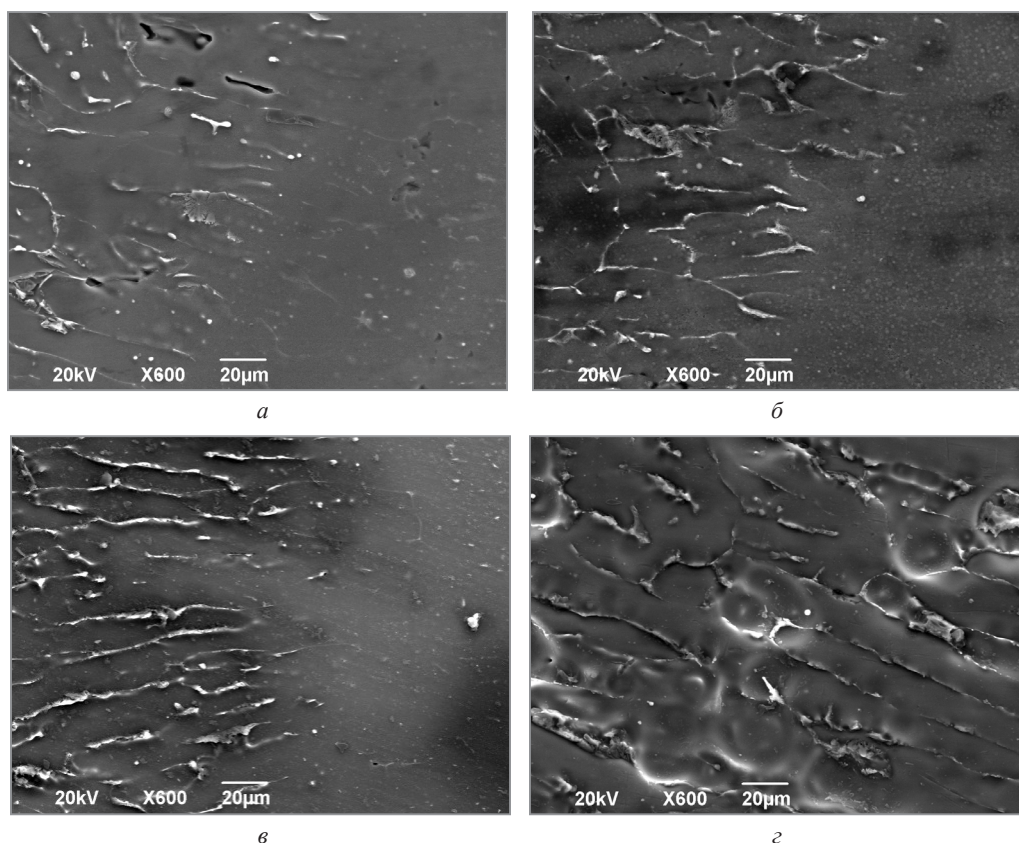


Рис. 6. Микроструктура сварного шва на границе с околосшовной зоной: *а* – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 3; *г* – образец 4

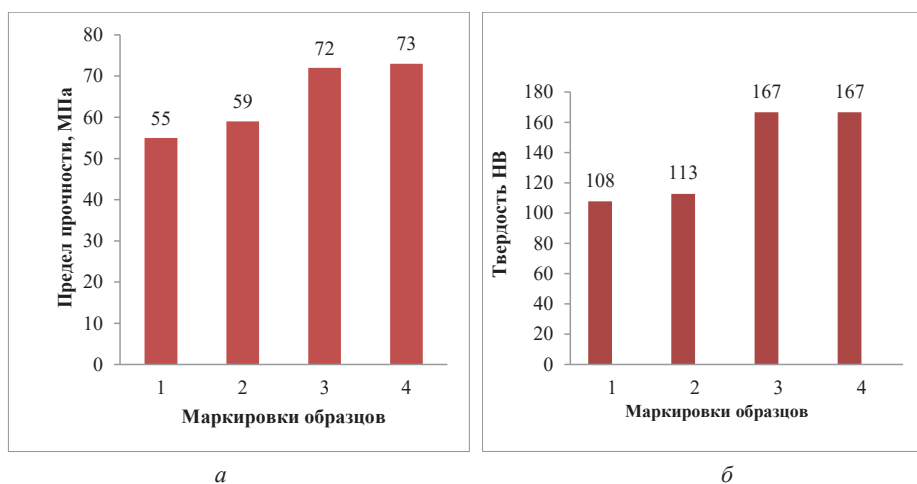


Рис. 7. Зависимость предела прочности (*а*) и твердости (*б*) сварного шва от режимов магнитно-импульсной обработки

В целом влияние МИО по режимам 3 и 4 обусловило увеличение предела прочности на 32%, а твердости – на 54%. Повышение прочностных характеристик может быть обусловлено измельчением структуры в сварочной ванне и выраженным проявлением отрицательного магнитоэластического эффекта [14]. В данном случае его проявление может быть связано с увеличением плотности дефектов в кристаллизующемся материале за счет действия электродинамических сил, что может приводить к повышению уровня остаточных напряжений и тормозить движение дислокаций.

Выводы

В результате проведения экспериментальных работ по сварке сплава АД1Н с одновременной магнитно-импульсной обработкой установлено, что при воздействии сильного электромагнитного поля происходят существенные структурные изменения в сварном шве и изменяются его механические свойства.

Установлено, что при сварке с одновременной МИО с энергией разряда 350 Дж и выше происходит измельчение структурных составляющих в зоне сварного шва за счет воздействия электродинамических сил, вызванных импульсным магнитным полем.

Полученные результаты свидетельствуют о благоприятном влиянии МИО в процессе сварки плавлением на качество сварного соединения и может способствовать повышению его технологических и эксплуатационных характеристик, а также сводит к минимуму склонность материала к образованию газовых несплошностей. Это открывает возможность применения данного способа и для аддитивных технологий: селективного сплавления порошков и формирования материала в процессах электродуговой наплавки и выращивания деталей по WAAM-технологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23–29–10195.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лившиц, Л. С. *Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений* / Л. С. Лившиц, А. Н. Хакимов. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.
2. Рябов, В. Р. *Сварка алюминия и его сплавов* / В. Р. Рябов. – Киев: Наукова думка, 1983. – 264 с.
3. Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW / H. J. Wang [et al.] // *In J. Mater. Process. Technol.* – 2004. – Vol. 148. – P. 93–102.
4. The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys / J. L. Gu [et al.] // *In J. Mater. Process. Technol.* – 2016. – Vol. 230. – P. 26–34.
5. Zhang, C. Workpiece vibration augmented wire arc additive manufacturing of high strength aluminum alloy / C. Zhang [et al.] // *In J. Mater. Process. Technol.* – 2019. – Vol. 271. – P. 85–92.
6. О воздействии импульсных магнитных полей на расплав / В. А. Глушченков [и др.] // *Металлургия машиностроения.* – 2012. – № 4. – С. 44–50.
7. Обработка расплавов магнитно-импульсными полями с целью управления структурой и свойствами промышленных силицидов / К. В. Никитин [и др.] // *Изв. вузов. Цветная металлургия.* – 2016. – № 2. – С. 34–42.
8. О магнитно-импульсной обработке расплава силумина АК9Т / Д. Г. Черников [и др.] // *Литейное производство.* – 2011. – № 9. – С. 8–11.
9. Черников, Д. Г. *Исследование влияния обработки расплавов импульсным магнитным полем высокой напряженности на структуру и свойства алюминий-кремниевых сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук.* – Самара, 2011. – 20 с.
10. Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ) / А. Б. Прокофьев [и др.]. Самара: АНО «Изд-во СНЦ», 2019. – 140 с.
11. Алифанов, А. В. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Ционенко // *Литье и металлургия.* – 2012. – № 4 (68). – С. 151–155.
12. Теоретическое и экспериментальное обоснование обработки расплавов на основе алюминия импульсными магнитными полями / К. В. Никитин, Е. А. Амосов, В. И. Никитин [и др.] // *Изв. вузов. Цветная металлургия.* – 2015. – № 5. – С. 11–19.
13. Алюминий, сплавы и марки алюминия. Марочник металлов. URL: https://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/alu/ Дата обращения 20.09.23.
14. Васильев, М. А. Особенности пластической деформации металлов и сплавов в магнитном поле. Обзор / М. А. Васильев // *Успехи физики металлов.* – 2007. – Т. 8. – С. 65–105.

REFERENCES

1. Livshits L. S., Khakimov A. N. *Metallovedenie svarki i termicheskaja obrabotka svarnyh soedinenij* [Metal science of welding and heat treatment of welded joints]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 336 p.
2. Ryabov V. R. *Svarka aljuminija i ego splavov* [Welding of aluminum and its alloys]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1983, 264 p.
3. Wang H. J., Jiang W. H., Ouyang J. H., Kovacevic R. Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW. *In J. Mater. Process. Technol.*, 2004, vol. 148, pp. 93–102.
4. Gu J. L., Ding J. L., Williams S. W., Gu H. M. et al. The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys. *In J. Mater. Process. Technol.*, 2016, vol. 230, pp. 26–34.
5. Zhang C., Gao M., Zeng X. Y. Workpiece vibration augmented wire arc additive manufacturing of high strength aluminum alloy. *In J. Mater. Process. Technol.*, 2019, vol. 271, pp. 85–92.
6. Glushchenkov V. A., Chernikov D. G., Nikitin V. I., Nikitin K. V. O vozdeystvii impul'snyh magnitnyh polej na rasplav [On the effect of pulsed magnetic fields on the melt]. *Metallurgija mashinostroenija = Metallurgy of mechanical engineering*, 2012, no. 4, pp. 44–50.
7. Nikitin K. V., Nikitin V. I., Timoshkin I. Yu. et al. Obrabotka rasplavov magnitno-impul'snymi poljami s cel'ju upravlenija strukturoj i svojstvami promyshlennyh siluminov [Processing of melts with magnetic pulse fields to control the structure and properties of industrial silumins]. *Izvestija vuzov. Cvetnaja metallurgija = News of universities. Non-ferrous metallurgy*, 2016, no. 2, pp. 34–42.
8. Chernikov D. G., Glushchenkov V. A., Grechnikov F. V. et al. O magnitno-impul'snoj obrabotke rasplava silumina AK9T [On magnetic-pulse processing of AK9T silumin melt]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2011, no. 9, pp. 8–11.
9. Chernikov D. G. Study of the influence of processing melts with a high-intensity pulsed magnetic field on the structure and properties of aluminum-silicon alloys: autoref. dis. ... cand. tech. Sci. Samara, 2011, 20 p.
10. Prokofiev A. B., Belyaeva I. A. et al. *Magnitno-impul'snaja obrabotka materialov* [Magnetic pulse processing of materials (MPM)]. Samara, ANO "Publishing House SNTs" Publ., 2019, 140 p.

11. **Alifanov A.V., Popova Zh.A., Tsionenko N.M.** Mehanizm uprochnenija legirovannyh stalej v impul'snom magnitnom pole [Mechanism of hardening of alloy steels in a pulsed magnetic field]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 4 (68), pp. 151–155.
12. **Nikitin K.V., Amosov E.A., Nikitin V.I. et al.** Teoreticheskoe i jeksperimental'noe obosnovanie obrabotki rasplavov na osnove aljuminija impul'snymi magnitnymi poljami [Theoretical and experimental substantiation of the processing of aluminum-based melts with pulsed magnetic fields]. *Izvestija vuzov. Cvetnaja metallurgija = News from universities. Non-ferrous metallurgy*, 2015, no. 5, pp. 11–19.
13. Aluminum, alloys and grades of aluminum. Marker of metals. URL: https://metallichekiy-portal.ru/marki_metallov/alu/ Date of access 09/20/23.
14. **Vasiliev M.A.** Osobennosti plasticheskoj deformacii metallov i splavov v magnitnom pole. Obzor [Features of plastic deformation of metals and alloys in a magnetic field. Review]. *Uspehi fiziki metallov = Advances in metal physics*, 2007, vol. 8, pp. 65–105.