

УДК 621.791.92 : 621.791.754 : 621.791.042

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ СПЛАВА Св-АК5 ЗА СЧЕТ ГИБРИДИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2024 К.В. Никитин¹, С.С. Жаткин¹, Д.А. Дунаев¹, Д.Г. Черников²,
А.К. Скороумов², Е.А. Минаков¹

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 26.06.2024

В работе показана актуальность разработки гибридных технологий, основанных на совмещении электродуговой объемной наплавки с другими внешними воздействиями на наплавляемые слои: применение нескольких источников энергии (лазер и электрическая дуга), сочетание наплавки и процессов формообразования (деформационное воздействие, дробеструйная обработка, лазерное упрочнение и др.). В работе оценивали потенциальную возможность создания гибридной технологии «электро-дуговая наплавка – магнитно-импульсная обработка» при получении образцов из сплава Св-АК5 (система Al-Si). Комплекс для реализации гибридной технологии создан на базе коллаборативного робота-манипулятора и сварочного инверторного полуавтомата. Разработаны конструкции, изготовлены и испытаны 2 вида совмещенных со сварочной горелкой одновитковых индукторов для магнитно-импульсной обработки наплавляемых образцов: индуктор в виде открытого тора, охватывающий сопло сварочной горелки, и прямоугольный индуктор, сопряженный последовательно с горелкой. Средствами компьютерного моделирования и натуральных экспериментов установлено, что наиболее эффективным является индуктор в виде открытого тора, охватывающий сопло сварочной горелки. Индуктор такого вида подает магнитно-импульсные разряды непосредственно в формируемую жидкую ванну в процессе наплавки. Наплавку проводили в среде защитного газа аргон. В качестве основного варьируемого параметра МИО служила энергия разряда W в интервале $180 \div 518$ Дж при одинаковом количестве импульсов (20 шт.). Исследование микроструктуры опытных образцов показало, что МИО оказывает существенное модифицирующее воздействие на дендриты α -Al сплава Св-АК5, получаемого по гибриднему процессу «электродуговая наплавка - магнитно-импульсная обработка». Дефекты структуры в процессе металлографических исследований наплавленных образцов не выявлены.

Ключевые слова: аддитивные технологии, гибридные технологии, электродуговая наплавка, магнитно-импульсная обработка, индуктор, микроструктура.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-289-297

EDN: JEIKNR

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

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии в настоящее время находят все более широкое применение в раз-

Жаткин С.С., кандидат технических наук, профессор кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии».
E-mail: sergejat@mail.ru.

Никитин К.В., доктор технических наук, профессор, декан факультета машиностроения, металлургии и транспорта. E-mail: kvn-6411@mail.ru.

Дунаев Д.А., аспирант, инженер кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии».
E-mail: dimjkee830@gmail.com

Черников Д.Г., кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИЛ-41, доцент кафедры обработки металлов давлением. E-mail: omd@ssau.ru

Скороумов А.К., магистрант кафедры обработки металлов давлением. E-mail: andreyskoroumov@mail.ru

Минаков Е.А., инженер, ассистент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии».
E-mail: goodspik@yandex.ru

личных отраслях промышленности [1-6]. К разновидности аддитивного производства изделий из металломатричных материалов является объемная электродуговая наплавка присадочных материалов в виде проволоки из сплавов различных систем (WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing). По сравнению с SLS- и SLM-технологиями, основанных на применении металлопорошковых композиций (МПК) развитие данного вида аддитивного производства обусловлено следующими основными преимуществами WAAM-процесса: доступность и более низкая стоимость присадочного материала для печати объектов; высокая производительность; возможность получения заготовок сложной конфигурации за счет использования многопозиционных роботов-манипуляторов; возможность получения заготовок больших габаритных размеров [7-9].

В последнее время с целью повышения эффективности интеграции аддитивных техноло-

гий в существующие производственные процессы развивается подход, получивший название «гибридные технологии» [10-12]. Под данным термином понимается совокупность технологий, позволяющих дополнить их положительные стороны и устранить индивидуальные недостатки [12]. Наиболее простым примером гибридной технологии может служить совмещение аддитивного и субтрактивного (обработка резанием) процессов в единый технологический цикл [10, 11]. В связи с тем, что для реализации WAAM-технологии применяют многоосевые роботы-манипуляторы, этот аддитивный процесс достаточно легко интегрируется с технологиями механической обработки на подобных роботах-манипуляторах. Для повышения качества наплавляемых слоев предлагается использовать одновременно несколько источников энергии: лазер и электрическую дугу [13]. Электродуговая наплавка может совмещаться с различными процессами формообразования: «наплавка – прокатка» [14], «наплавка - дробеструйная обработка» [15], «наплавка - лазерное упрочнение» [15]. Перспективным научно-практическим направлением является интеграция электродуговой сварки, совмещенной с воздействием на сварочный шов импульсными магнитными полями [16].

Изначально эффективность магнитно-импульсной обработки (МИО), в качестве физического способа, оценивали при воздействии на алюминиевые расплавы системы Al-Si [17, 18]. Было установлено положительное влияние МИО на структуру и свойства силуминов.

Алюминиевые сплавы являются одними из наиболее перспективных материалов для электродуговой наплавки, особенно в возможностях получения заготовок больших габаритных размеров. Проводятся исследования использования электродуговой наплавки для получения наплавленных образцов из различных систем на основе алюминия: Al-Cu, Al-Mg, Al-Zn-Mg-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Si, Al-Mg, Al-Mg-Si, Al-Mg-Mn.

Проволочно-дуговое аддитивное производство (WAAM-технология) является перспективной технологией и альтернативой механической обработке при изготовлении крупных деталей со сложной геометрией. По сравнению с порошковыми аддитивными производственными процессами WAAM-технология обеспечивает высокую скорость послойного осаждения, а также более высокий коэффициент использования наплавляемого материала [19, 20].

Целью данной работы являлось оценить возможность создания гибридной технологии «электродуговая наплавка - магнитно-импульсная обработка» для исследования структуры и свойств образцов из сплава Св-АК5 (система Al-Si).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Гибридный комплекс разрабатывали в лаборатории электрофизических технологий СамГТУ. Комплекс по электродуговой наплавке включает в себя коллаборативный робот-манипулятор DOBOT CR10 (Китай) и сварочный инверторный полуавтомат EWM Titan 350 XQ puls D (Германия) с системой подачи проволоки внутреннего исполнения.

В качестве присадочного материала для наплавки использовали проволоку марки Св-АК5 диаметром 1 мм (табл. 1).

Материалом субстрата являлись заготовки из деформируемого сплава АМг6 в виде плиты толщиной 6 мм. В качестве защитного газа использовался аргон высокой частоты с расходом 12 л/мин.

Для магнитно-импульсной обработки наплавляемых слоев использовали опытную установку МИУ-1, разработанную и изготовленную специалистами НИЛ-41 Самарского государственного университета им. С.П. Королева. МИУ-1 представляет собой генератор однократных сильноточных импульсов с емкостным накопителем энергии. Функциональная схема МИУ-1 представлена на рис. 1.

Зарядное устройство преобразует переменное напряжение питающей сети и заряжает накопитель энергии (НЭ) постоянным напряжением в диапазоне – 1...10 кВ. Накопитель состоит из батареи импульсных конденсаторов, объединенных на разряднике ошиновкой с малой индуктивностью. При достижении заданного уровня напряжения блок управления прекращает заряд и выдает команду на блок запуска разрядника. Конденсаторы разряжаются через разрядник Р1 на индуктор L1, магнитное поле которого воздействует на заготовку.

Параметры разрядного контура, состоящего из накопителя энергии и разрядника, определяют основные технические характеристики МИУ-1, представленные в табл. 2. Разрядный ток через индуктор имеет форму затухающей синусоиды, с числом полупериодов колебания от 2 до 6 (рис. 2). Для проведения данных экс-

Таблица 1. Химический состав присадочной проволоки Св-АК5 (ГОСТ 7871-2019)

Основные легирующие, %		Примеси, %, не более			Al
Si	Ti	Mn	Zn	Fe	
4,5-6,0	0,1-0,2	0,01	0,01	0,2	Основа

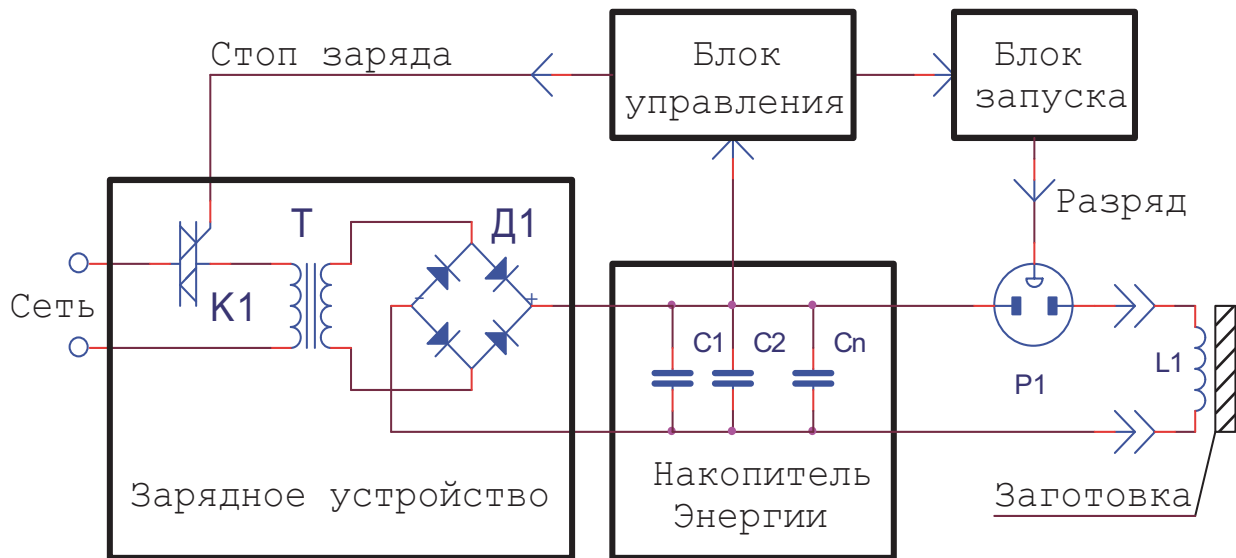


Рис. 1. Функциональная схема магнитно-импульсной установки МИУ-1:
 Т1 – высоковольтный трансформатор; К1 – регулятор зарядного тока; Д1 – выпрямитель;
 С1...С_н – импульсные конденсаторы; P1 – разрядник; L1 – индуктор

Таблица 2. Основные характеристики МИУ-1

№ п/п	Наименование параметра	Ед. измерения	Значение
1	Максимальная запасаемая энергия, W_{\max}	Дж	1200
2	Диапазон изменения напряжения заряда, U_0	кВ	1...10
3	Емкость накопителя энергии, C_n	мкФ	24
4	Частота разрядного тока, F_p	кГц	10...60
5	Период следования импульсов разряда	с	0,5...2
6	Амплитуда разрядного тока, $I_{1\max}$	кА	5...50
7	Питание МИУ от сети	В	220
8	Масса с зарядным устройством	кг	300

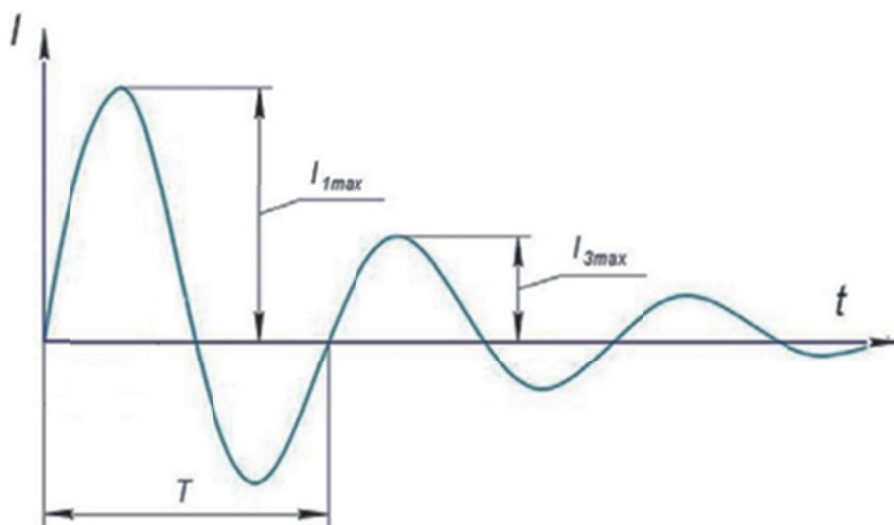


Рис. 2. Характер разрядного тока

периментальных исследований МИУ-1 была модернизирована с целью повышения частоты скважности импульсов разряда, которая составила 1 Гц.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Принципиальная схема гибридного комплекса для реализации технологии «электродуговая наплавка - магнитно-импульсная обработка» представлена на рис. 3.

С целью проведения экспериментальных исследований по оценке влияния параметров

магнитно-импульсной обработки наплаваемых слоев по WAAM-технологии на структуру и свойства опытных образцов были разработаны конструкции и изготовлены одновитковые индуктора, сопряженные со сварочной горелкой (рис. 4). В одном случае (рис. 4, а) индуктор имеет форму открытого тора и охватывает сопло сварочной горелки. Во втором - индуктор выполнен в виде прямоугольной рамки и совмещен с соплом горелки последовательно (рис. 4, б).

Сварочная горелка крепится к роботу при помощи кронштейна. К этому же кронштейну крепится держатель одновиткового индуктора. Конструкция держателя предусматривает воз-

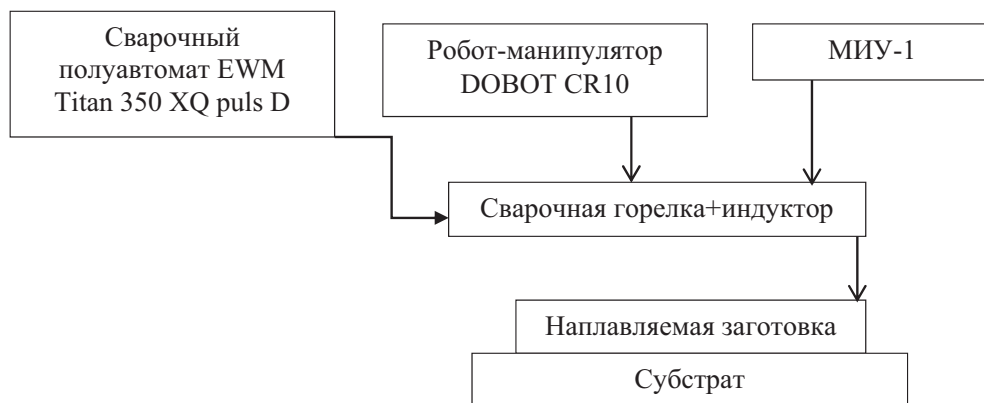


Рис. 3. Принципиальная схема технологии «электродуговая наплавка - магнитно-импульсная обработка»

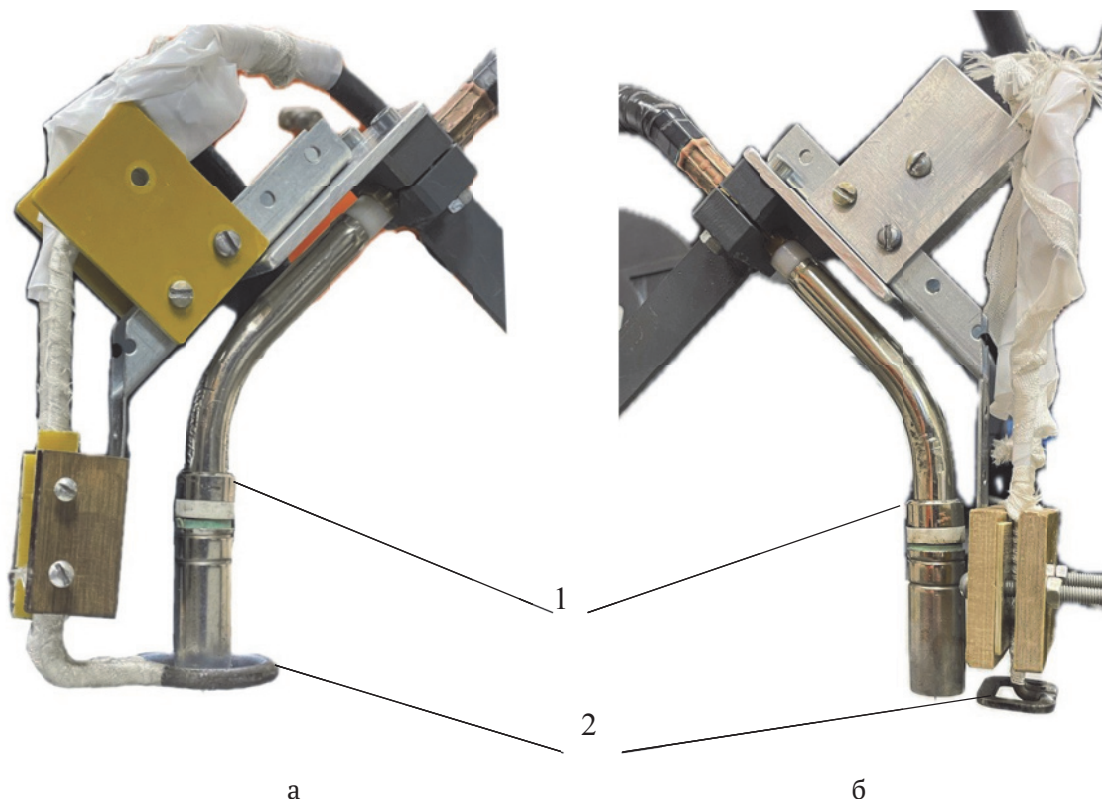


Рис. 4. Конструкции индукторов, сопряженных со сварочной горелкой:
 а - индуктор в виде открытого тора, охватывающий сопло горелки;
 б - прямоугольный индуктор, сопряженный последовательно с горелкой;
 1 - сварочная горелка; 2 - индуктор

возможность регулирования положения рабочей зоны индуктора относительно ванны расплава. За счет элементов держателя регулируется зазор между рабочей поверхностью индуктора и поверхностью ванны расплава при наплавке. На кронштейне установлены дополнительные пластины, необходимые для фиксации кабеля, соединяющего индуктор и магнитно-импульсную установку МИУ-1.

Основным силовым фактором при МИ является энергия разряда W (Дж) единичного импульса. Было выполнено моделирование напряженности электромагнитного поля (ЭМП) при единичном импульсе с $W \sim 186$ Дж (рис. 5).

По результатам моделирования установлено, что при единичном импульсе максимальное напряжение на датчике импульсного магнитного поля (ИМП) достигается при использовании индуктора в виде открытого тора (рис. 5, а). Причем, импульс имеет форму правильного усеченного конуса с напряжением на датчике ИМП в зоне подачи присадочного материала ~ 2000 мВ.

При использовании прямоугольного индуктора напряжение на датчике ИМП

достигает 750 мВ (рис. 5, б). При этом формируется два пика в виде «холмов», повторяющих форму внутреннего пространства индуктора.

Далее были выполнены тестовые наплавки, совмещенные с процессом МИО с каждым видом индуктора. Режимы наплавки и параметры МИО были одинаковыми (табл. 3). Общий вид комплекса для совмещенного процесса представлен на рис. 6.

По внешнему виду наплавленных образцов было установлено следующее:

- при использовании индуктора в виде открытого тора (рис. 5, а) магнитно-импульсный разряд подается непосредственно в зону наплавки (в жидкую ванну) без разбрызгивания расплава; поверхность наплавляемого слоя – ровная, блестящая, без видимых дефектов;

- при использовании прямоугольного индуктора магнитно-импульсный разряд подается на затвердевшую поверхность наплавленного участка; поверхность наплавленного участка имеет искажение по геометрии, покрыта мелкими трещинами.

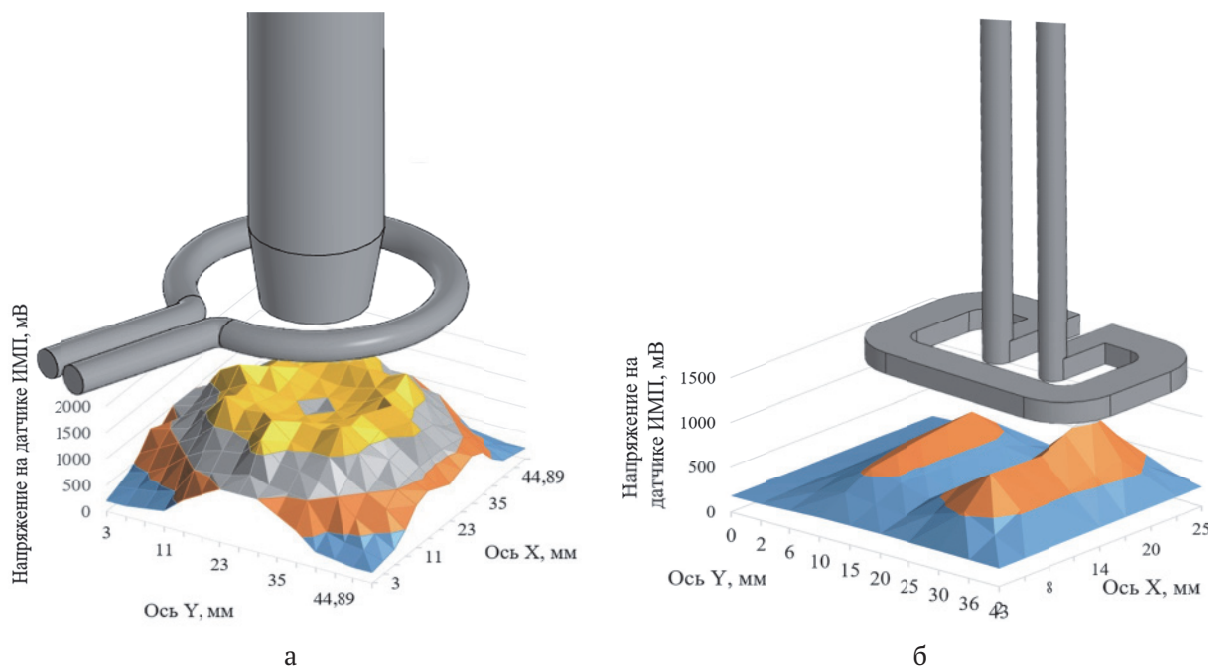


Рис. 5. Результаты моделирования напряженности ЭМП в зависимости от вида индуктора: а – индуктор в виде открытого тора; б – прямоугольный индуктор

Таблица 3. Параметры электродуговой наплавки тестовых образцов*

Защитный газ	Расход газа, л/мин	Сила тока, А	Скорость печати, мм/мин	Количество наплавляемых слоев/высота наплавки, шт./мм	Режим	Энергия разряда МИО/количество разрядов, Дж/шт.
Ar	15	105	450	6/10	Импульсный	186/20

*Диаметр присадочной проволоки – 1 мм; скорость подачи – 7 м/мин; длина наплавленных образцов – 100 мм



Рис. 6. Общий вид комплекса для совмещенного процесса «электродуговая наплавка - магнитно-импульсная обработка»

На основании результатов тестовых наплавок для дальнейшей апробации процесса использовали индуктор в виде открытого тора. Исследовали влияние энергии разряда (табл. 4) на микроструктуру в поперечном сечении наплавленных образцов (рис. 7). Режимы электродуговой наплавки – по табл. 3.

Анализ полученных результатов показал следующее. При всех значениях W разряд подается непосредственно в зону наплавки, разбрызгивания жидкой ванны не происходит. Образцы 0-3 (табл. 4), полученные в результате экспериментов, имеют стабильную геометрию. Магнитно-импульсная обработка оказывает ощутимое модифицирующее воздействие на микроструктуру сплава Св-АК5, максимальное измельчение дендритов α -Al установлено при обработке наплаваемых слоев с энергией разряда 518 Дж. Несплавленные слои отсутствуют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана принципиальная возможность создания комплекса для реализации гибридной технологии «электродуговая наплавка - магнитно-импульсная обработка». Разработаны конструкции, изготовлены и испытаны 2 вида индукторов для магнитно-импульсной обработки наплаваемых образцов. Средствами компьютерного моделирования и натуральных экспериментов установлено, что наиболее эффективным является индуктор в виде открытого тора, охватывающий сопло сварочной горелки. Индуктор такого вида подает магнитно-импульсные разряды непосредственно в формируемую жидкую ванну в процессе наплавки. Исследование микроструктуры опытных образцов показало, что МИО оказывает существенное модифицирующее воздействие на дендриты α -Al сплава Св-АК5, получаемого по гибричному процессу «электродуговая наплавка - магнитно-импульсная обработка».

Таблица 4. Режимы магнитно-импульсной обработки

Маркировка образцов	Режимы МИО	
	W, Дж	Количество импульсов на один слой, шт.
0	-	-
1	186	20
2	332	
3	518	

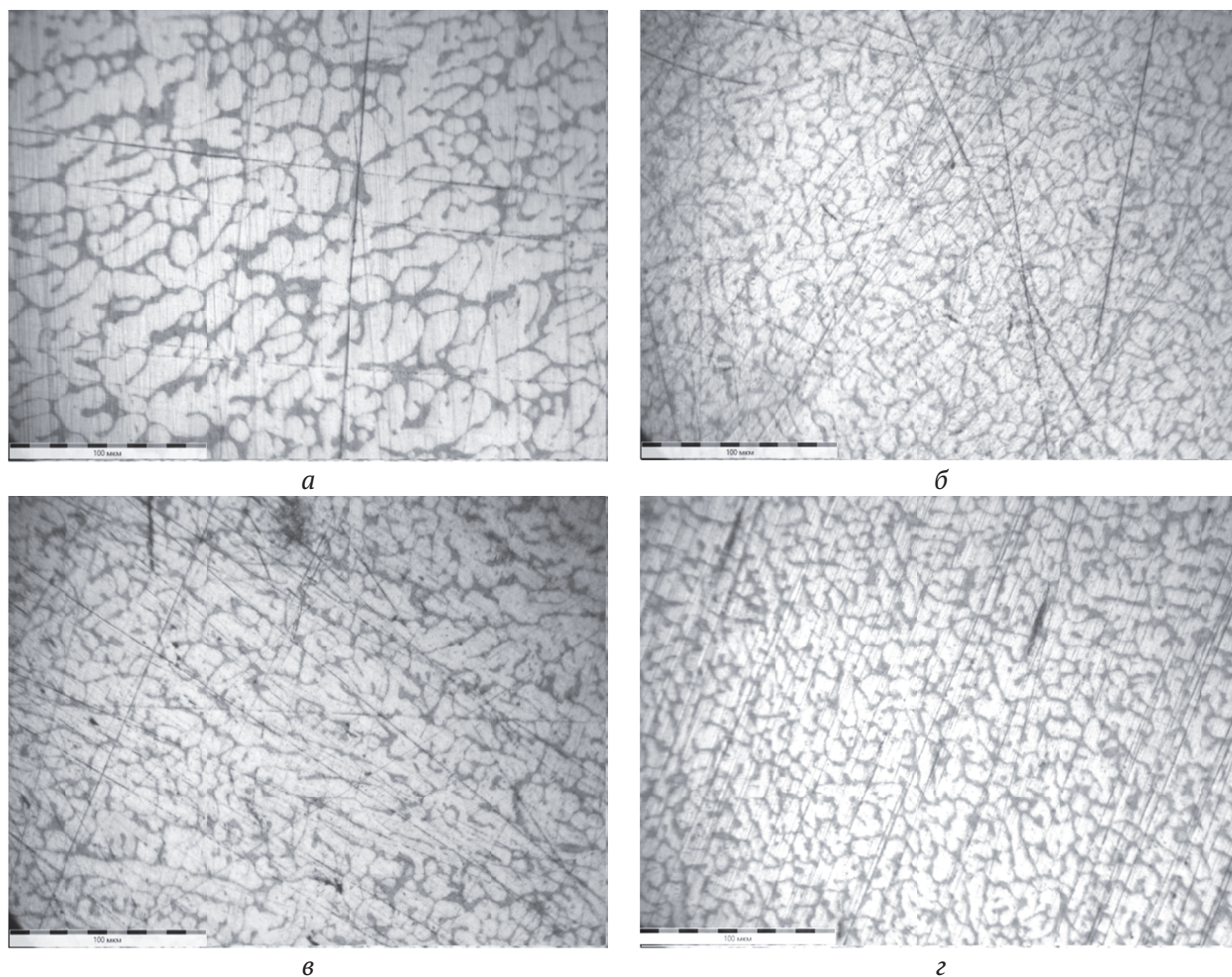


Рис. 7. Влияние энергии разряда МИО на микроструктуру наплавленных образцов:
 а – без МИО; б – энергия разряда 186 Дж; в – энергия разряда 332 Дж;
 г – энергия разряда 518 Дж

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Petrovic V., Gonzales J., Ferrando O., Gordillo J., Puchades J., Grinan L. Additive layered manufacturing: sectors of industrial applications shown through case studies. *International Journal of Production Research*. 2011. Vol. 49. P. 1061-1079.
2. Huang S., Liu P., Mokasdar A., Hou L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 67. P. 1191-1203.
3. Sharon L.N. Ford. Additive Manufacturing Technology: Potential Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness. *Journal of International Commerce and Economics*. Published electronically September 2014. URL: https://www.usitc.gov/journals/Vol_VI_Article4_Additive_Manufacturing_Technology.pdf (дата обращения 22.04.2024).
4. Gebhardt A., Hötter J.-S. *Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. Munich Hanser: Carl GmbH + Co., 2016.
5. Tuan D. Ngo, Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T.Q. Nguyen, David Hui. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 143. P. 172-196.
6. Dremukhin M. A., Nagovitsin V. N. Application of additive technologies in mechanical engineering for production of form-forming riggings. *Spacecrafts & Technologies*. 2022. Vol. 6. P. 21-28.
7. L.-E. Lindgren, A. LundbSck. Approaches in computational welding mechanics applied to additive manufacturing: Review and outlook. *Comptes Rendus Mecanique*. 2018. Vol. 346. Issue 11. P. 1033-1042.
8. Jianglong Gu, Xiaoshu Wang, Jing Bai, Jialuo Ding, Stewart Williams, Yuchun Zhai, Kun Liu. Deformation microstructures and strengthening mechanisms for the wire +arc additively manufactured Al-Mg4.5Mn alloy with inter-layer rolling. *Materials Science & Engineering A*. 2018. Vol. 712. P. 292-301.
9. Конкевич, В.Ю. Структурообразование при аддитивной наплавке WAAM и L-DED с использованием проволоки, полученной из слитков AlMg-сплавов с переходными металлами методом электромагнитной кристаллизации / В.Ю. Конкевич, В.Н. Тимофеев, Г.П. Усынина, В.В. Белоцерковец // Цветные сплавы. – 2023. – №.7. – С.47-55.
10. Strong D., Kay M., Conner B., Wakefield Th., Manogharan G. Hybrid manufacturing – integrating traditional manufacturers with additive manufacturing (AM) supply chain. *Additive Manufacturing*. 2018. No. 21. P. 159-173.

11. Киричек, А.В. Аддитивно-субтрактивные технологии – эффективный переход к инновационному производству / А.В. Киричек, О.Н. Федонин, Д.Л. Соловьев, А.А. Жирков, А.В. Хандожко, Е.В. Смоленцев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 8. – С. 4-10.
12. Балякин, А.В. Обзор гибридного аддитивного производства металлических деталей / А.В. Балякин, М.А. Олейник, Е.П. Злобин, Д.Л. Скуратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2022. – Т. 21. – No.2. – С. 48-64.
13. Zhang H., Qian Y., Wang G., Zheng Q. The characteristics of arc beam shaping in hybrid plasma and laser deposition manufacturing. Science in China, Series E: Technological Sciences. 2006. Vol. 49, Iss. 2. P. 238-247.
14. Colegrove P.A., Donoghue J., Martina F., Gu J., Prangnell P., Hönnige J. Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components. Scripta Materialia. 2017. V. 135. P. 111-118.
15. Bamberg J., Hess T., Hessert R., Satzger W. Verfahren zum herstellen, reparieren oder austauschen eines bauteils mit verfestigen mittels druckbeaufschlagung. German Patent Application WO 2012152259 A1, 2012.
16. 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.
17. Никитин, К.В. Теоретическое и экспериментальное обоснование обработки расплавов на основе алюминия импульсными магнитными полями / К.В. Никитин, Е.А. Амосов, В.И. Никитин, В.А. Глушечков, Д.Г. Черников // Изв. вузов. Цвет. металлургия. – 2015. – №. 5. – С. 11-19.
18. Никитин, К.В. Обработка расплавов магнитно-импульсными полями с целью управления структурой и свойствами промышленных силуминов / К.В. Никитин, В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин, В.А. Глушечков, Д.Г. Черников // Изв. вузов. Цвет. Металлургия. – 2016. – №. 2. – С. 34-42.
19. Köhler M., Fiebig S., Hensel J., Dilger K. Wire and Arc Additive Manufacturing of Aluminum Components. Metals. 2019. Vol. 9. No. 5. P. 1-9.
20. Köhler M., Hensel J., Dilger K. Effects of Thermal Cycling on Wire and Arc Additive Manufacturing of Al-5356 Components. 2020. Metals. Vol. 10. No.7. P. 2-11.

INCREASING THE EFFICIENCY OF ELECTRIC ARC WELDING OF THE SV-AK5 ALLOY DUE TO HYBRIDIZATION OF TECHNOLOGIES

© 2024 K.V. Nikitin¹, S.S. Zhatkin¹, D.A. Dunaev¹, D.G. Chernikov²,
A.K. Skoroumov², E.A. Minakov¹

¹ Samara State Technical University, Samara, Russia

² Samara National Research University, Samara, Russia

The paper shows the relevance of the development of hybrid technologies, based on the combination of electric arc volumetric surfacing with other external influences on the deposited layers: the use of several energy sources (laser and electric arc), a combination of surfacing and shaping processes (deformation, shot blasting, laser hardening, etc.). The paper evaluated the potential possibility of creating a hybrid technology “electro-arc surfacing – magnetic pulse treatment (MPT)” for obtaining samples from the Sv-AK5 alloy (Al-Si system). The complex for the implementation of hybrid technology was created on the basis of a collaborative robot-manipulator and a welding inverter semi-automatic. Designs have been developed, 2 types of single-turn inductors combined with a welding torch for magnetic pulse processing of deposited samples have been manufactured and tested: an inductor in the form of an open torus covering the nozzle of the welding torch, and a rectangular inductor coupled in series with the welding torch. By means of computer modeling and field experiments, it was found that the most effective is an inductor in the form of an open torus covering the nozzle of a welding torch. An inductor of this type delivers magnetic pulse discharges directly into the formed liquid bath during the surfacing process. The surfacing was carried out in the environment of argon protective gas. The main variable parameter of the MPT was the discharge energy W in the range $180 \div 518$ J with the same number of pulses (20 pcs.). The study of the microstructure of the prototypes showed that MPT has a significant modifying effect on the dendrites of the α -Al alloy Sv-AK5, obtained by the hybrid process «electric arc surfacing - magnetic pulse treatment».

Structural defects were not detected during metallographic studies of the deposited samples.
Keywords: additive technologies, hybrid technologies, electric arc welding, magnetic pulse treatment, inductor, microstructure

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-289-297

EDN: JEIKNR

REFERENCES

1. Petrovic V., Gonzales J., Ferrando O., Gordillo J., Puchades J., Grinan L. Additive layered manufacturing: sectors of industrial applications shown through case studies. International Journal of Production Research. 2011. Vol. 49. P. 1061-1079.
2. Huang S., Liu P., Mokusdar A., Hou L. Additive

- manufacturing and its societal impact: a literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 67. P. 1191-1203.
3. Sharon L.N. Ford. Additive Manufacturing Technology: Potential Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness. *Journal of International Commerce and Economics*. Published electronically September 2014. URL: https://www.usitc.gov/journals/Vol_VI_Article4_Additive_Manufacturing_Technology.pdf (data obrashcheniya 22.04.2024).
 4. Gebhardt A., Hötter J.-S. *Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. Munich Hanser: Carl GmbH + Co., 2016.
 5. Tuan D. Ngo, Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T.Q. Nguyen, David Hui. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 143. P. 172-196.
 6. Dremukhin M. A., Nagovitsin V. N. Application of additive technologies in mechanical engineering for production of form-forming riggings. *Spacecrafts & Technologies*. 2022. Vol. 6. R. 21-28.
 7. L.-E. Lindgren, A. LundbSck. Approaches in computational welding mechanics applied to additive manufacturing: Review and outlook. *Comptes Rendus Mecanique*. 2018. Vol. 346. Issue 11. P. 1033-1042.
 8. Jianglong Gu, Xiaoshu Wang, Jing Bai, Jialuo Ding, Stewart Williams, Yuchun Zhai, Kun Liu. Deformation microstructures and strengthening mechanisms for the wire +arc additively manufactured Al-Mg4.5Mn alloy with inter-layer rolling. *Materials Science & Engineering A*. 2018. Vol. 712. P. 292-301.
 9. Konkevich, V.Yu. Strukturnoobrazovanie pri additivnoj naplavke WAAM i L-DED s ispol'zovaniem provoloki, poluchennoj iz slitkov AlMg-splavov s perekhodnymi metallami metodom elektromagnitnoj kristallizacii / V.Yu. Konkevich, V.N. Timofeev, G.P. Usynina, V.V. Belocerkovec // *Cvetnye splavy*. – 2023. – №.7. – S.47-55.
 10. Strong D., Kay M., Conner B., Wakefield Th., Manogharan G. Hybrid manufacturing – integrating traditional manufacturers with additive manufacturing (AM) supply chain. *Additive Manufacturing*. 2018. No. 21. P. 159-173.
 11. Kirichek, A.V. Additivno-subtraktivnye tekhnologii – effektivnyj perekhod k inno-vacionnomu proizvodstvu / A.V. Kirichek, O.N. Fedonin, D.L. Solov'ev, A.A. ZHirkov, A.V. Handozhko, E.V. Smolencev // *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. – 2019. – № 8. – S. 4-10.
 12. Balyakin, A.V. Obzor gibridnogo additivnogo proizvodstva metallicheskih detalej / A.V. Balyakin, M.A. Olejnik, E.P. Zlobin, D.L. Skuratov // *Vestnik Samarskogo uni-versiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*. – 2022. – T. 21. – No.2. – S. 48-64.
 13. Zhang H., Qian Y., Wang G., Zheng Q. The characteristics of arc beam shaping in hybrid plasma and laser deposition manufacturing. *Science in China, Series E: Technological Sciences*. 2006. Vol. 49, Iss. 2. P. 238-247.
 14. Colegrove P.A., Donoghue J., Martina F., Gu J., Prangnell P., Hönnige J. Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components. *Scripta Materialia*. 2017. V. 135. P. 111-118.
 15. Bamberg J., Hess T., Hessert R., Satzger W. Verfahren zum herstellen, reparieren oder austauschen eines bauteils mit verfestigen mittels druckbeaufschlagung. German Patent Application WO 2012152259 A1, 2012.
 16. Nikitin, K.V. Primenenie magnitno-impul'snoj obrabotki pri elektrodugovoj svarke splava AD1N / K.V. Nikitin, S.S. Zhatkin, D.G. Chernikov, A.K. Skoroumov, D.A. Dunaev, V.A. Novikov // *Lit'e i metallurgiya*. – 2023. – №. 4. – C. 101-108.
 17. Nikitin, K.V. Teoreticheskoe i eksperimental'noe obosnovanie obrabotki rasplavov na osnove alyuminiya impul'snymi magnitnymi polyami / K.V. Nikitin, E.A. Amosov, V.I. Nikitin, V.A. Glushchenkov, D.G. Chernikov // *Izv. vuzov. Cvet. metallurgiya*. – 2015. – №. 5. – S. 11-19.
 18. Nikitin, K.V. Obrabotka rasplavov magnitno-impul'snymi polyami s cel'yu upravleniya strukturaj i svojstvami promyshlennyh siluminov / K.V. Nikitin, V.I. Ni-kitin, I.YU. Timoshkin, V.A. Glushchenkov, D.G. Chernikov // *Izv. vuzov. Cvet. Metal-lurgiya*. – 2016. – №. 2. – S. 34-42.
 19. Köhler M., Fiebig S., Hensel J., Dilger K. Wire and Arc Additive Manufacturing of Aluminum Components. *Metals*. 2019. Vol. 9. No. 5. P. 1-9.
 20. Köhler M., Hensel J., Dilger K. Effects of Thermal Cycling on Wire and Arc Additive Manufacturing of Al-5356 Components. 2020. *Metals*. Vol. 10. No.7. P. 2-11.

K. Nikitin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Mechanical Engineering, Metallurgy and Transport. E-mail: kvn-6411@mail.ru

S. Zhatkin, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Foundry and High-efficiency Technologies. E-mail: sergejat@mail.ru

D. Dunaev, Postgraduate Student, Engineer of the Department «Foundry and High-efficiency Technologies». E-mail: dim-jkee830@gmail.com

D. Chernikov, Candidate of Technical Sciences, Art. scientific co-workers NIL-41, Associate Professor of the Department of Metal Forming. E-mail: omd@ssau.ru

A. Skoroumov, Master's Student of the Department of Metal Pressure Processing. E-mail: andreyskoroumov@mail.ru

E. Minakov, Engineer, Assistant of the Department «Foundry and High-efficiency Technologies».

E-mail: goodspik@yandex.ru