

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-2-26-35

УДК 621.791.763.2

А. О. КОРОТЕЕВ, канд. техн. наук, доц.

Н. М. ШУКАН

А. В. КЛИМЕНКОВА

А. Н. МИХЕЙКИНА

А. А. ЛОПАТИНА

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВОВ Al-Si ПРИ АДДИТИВНОМ СИНТЕЗЕ НА БАЗЕ ДУГОВЫХ СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (WAAM) С УПРАВЛЕНИЕМ МОЩНОСТЬЮ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЯ

Аннотация

На основании экспериментальных исследований определены особенности формирования микроструктуры сплавов Al-Si при аддитивной дуговой наплавке с использованием различной мощности тепловложения. Наплавка осуществлялась с использованием замкнутой гексагональной траектории на робототехническом комплексе без использования вращателя. Для минимизации мощности тепловложения использовалась технология реверсивной подачи присадочной проволоки CMT Fronius.

Ключевые слова:

аддитивные технологии, дуговая наплавка, WAAM, микроструктура, алюминиевые сплавы, мощность тепловложения, механические характеристики, управление параметрами режима.

Для цитирования:

Особенности формирования микроструктуры сплавов Al-Si при аддитивном синтезе на базе дуговых сварочных технологий (WAAM) с управлением мощностью тепловложения / А. О. Коротеев, Н. М. Шукан, А. В. Клименкова, А. Н. Михейкина, А. А. Лопатина // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 2 (83). – С. 26–35.

Введение

Эффективное развитие промышленности неразрывно связано с разработкой перспективных материалов, сталей и сплавов, обладающих уникальными свойствами благодаря новым подходам к системам легирования и упрочнения, а также необходимостью разработки новых методов их получения и обработки. Практический интерес вызывают материалы, обладающие не только требуемым комплексом свойств, но и возможностью управления этими свойствами в объеме заготовки.

Одним из эффективных способов получения таких материалов является аддитивный синтез. Возможность послойного создания изделий сложной геометрии открывает новые пути проектирования металлоконструкций,

т. к. не ограничивается существующими способами металлообработки. Аддитивные технологии занимают на сегодняшний день одно из наиболее динамично развивающихся направлений и позволяют создавать изделия, которые другими способами создать практически невозможно. Однако, несмотря на очевидные преимущества и возможности, массового применения такие технологии в условиях промышленности не нашли.

Существующие на сегодняшний день, преимущественно порошковые, лазерные технологии характеризуются чрезвычайно низкой производительностью, в связи с чем их применение в масштабах производства практически не наблюдается. Способ применим для создания прототипов, макетов, моделей и изделий в условиях единичного производства. Кроме того, создание

материалов с требуемым комплексом свойств представляет довольно сложную задачу, а создание управляемого градиента свойств становится практически невыполнимым в силу специфики технологии селективного плавления порошкового тонкодисперсного дорогостоящего материала. При этом возникает несколько трудностей, связанных не только с доступностью оборудования и порошковых материалов, но и формированием микроструктуры и свойств материала в объеме заготовки. В таких условиях точность геометрической формы, обеспечиваемая малым пятном нагрева лазерного луча, не является решающим фактором в выборе технологии.

Перспективным направлением является адаптация для целей аддитивного синтеза дуговых сварочных технологий. Такие подходы, известные как WAAM-технологии, на протяжении длительного времени хотя и рассматривались в качестве элемента классификации способов послойного создания изделий, широкого распространения не получали. В большей степени это было связано со сложностью управления расплавленным металлом на торце аддитивной наплавки, использованием достаточно больших диаметров присадочных плавящихся металлических проволочных материалов, повышенным тепловложением и практически неуправляемым переносом расплавленного электрической дугой металла в материал получаемой заготовки. Изделия имели достаточно грубую форму геометрии поверхности и боковых стенок и требовали значительной механической постобработки. Вместе с тем, активное развитие сварочных технологий позволило на сегодняшний день практически устранить указанные недостатки. Решающую роль в этом сыграл переход на использование инверторных источников питания и реализация цифровых программируемых систем управления электрическими параметрами режима. Это позволило не только с высокой частотой осуществлять актив-

ный контроль и задание требуемых значений силы тока и напряжения на дуге в реальном времени, но и реализовать уникальные системы и механизмы управления кинетикой подачи присадочного материала в рабочую зону. Такие подходы позволяют существенно снизить тепловложение в материал, реализовать управляемый процесс переноса присадочного материала путем кратковременных коротких замыканий в условиях импульсного дискретного реверсивного движения присадочной проволоки в обратном направлении, что за счет действия сил инерции заставляет каплю расплавленного металла перейти в ванну с минимальным значением силы тока. Это обеспечивает снижение глубины проплавления и рост коэффициента наплавки, что в условиях аддитивного синтеза является предпочтительным. Таким образом, система, являясь сварочной, решает обратную задачу и максимально эффективно подходит для создания изделий аддитивными методами. Во-первых, это позволяет в целом повысить производительность, по сравнению с порошковыми технологиями, в десятки раз. А во-вторых, путем применения двух и более присадочных материалов реализовать механизм создания в общей расплавленной ванне условий для управления химическим составом и свойствами материала путем изменения кинетики ввода проволок в рабочую зону. Такие подходы на сегодняшний день практически не реализованы на практике.

Одним из наиболее перспективных материалов, используемых для аддитивного синтеза изделий, являются алюминиевые сплавы. Высокая коррозионная стойкость, малый удельный вес и достаточно хорошие механические характеристики делают эти материалы более эффективными, по сравнению со сталями, в автомобильной, авиационной и химической промышленности. Изготовление изделий сложной геометрии сводится либо к литью, либо к механической обработке. В первом случае

присутствует большая вероятность появления дефектов металлургического происхождения, во втором – ограниченность возможностей получения сложной геометрии и большим расходом материала. В таких условиях аддитивные технологии представляются наиболее эффективными.

В работе приведены результаты исследования возможностей дуговых сварочных систем на базе СМТ Fronius для создания методами аддитивной дуговой послойной наплавки изделий из

алюминиевых сплавов Al-Si с управлением микроструктурным состоянием и комплексом свойств посредством изменения мощности тепловложения.

Основная часть

При проведении экспериментов использовалась проволока Böhler S Al 4043A (AlSi5(A)) – EN ISO 18273 / ER 4043 – AWS A5.10 диаметром 1 мм. Химический состав и механические свойства проволоки представлены в табл. 1 и 2.

Табл. 1. Химический состав используемой проволоки

Марка проволоки	Содержание элемента, % (остальное Al)			
	Cu	Si	Fe	Mg
ER 4043 (AWS A5.10)	< 0,3	4,5...6,0	< 0,6	< 0,2

Табл. 2. Механические свойства используемой проволоки

Марка проволоки	Значение показателя		
	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %
ER 4043 (AWS A5.10)	≥ 40	≥ 120	≥ 8

Наплавка выполнялась на робототехническом комплексе, представленном на рис. 1. В качестве траектории движения выбран гексагональный профиль, что, с одной стороны, обеспечивает непрерывность перемещения, с другой – простоту подготовки образцов для исследования микроструктуры и свойств материала, т. к. боковые стенки плоские.

Контроль значений параметров режима обеспечивался системой регистрации РКДП-0401, оснащенной датчиками тока и напряжения. Скорость перемещения задавалась через пульт управления роботом. При этом наплавка осуществлялась без поперечных колебаний с подъемом горелки в каждом слое на 2...3 мм в зависимости от режима.

Внешний вид части образцов представлен на рис. 1.

С целью оценки влияния мощности тепловложения на характер формирования микроструктуры материала, наплавка выполнялась с использованием трех технологий:

1) традиционная технология с выполнением стенки толщиной 3 мм за один проход без поперечных колебаний (технология 1);

2) традиционная технология с выполнением стенки толщиной 6 мм в один проход без поперечных колебаний посредством увеличения силы тока и снижения скорости перемещения (технология 2);

3) наплавка с использованием сис-

темы с реверсивной подачей присадочной проволоки CMT (Cold Metal Transfer) Fronius с выполнением стенки

толщиной 3 мм за один проход без поперечных колебаний (технология 3).

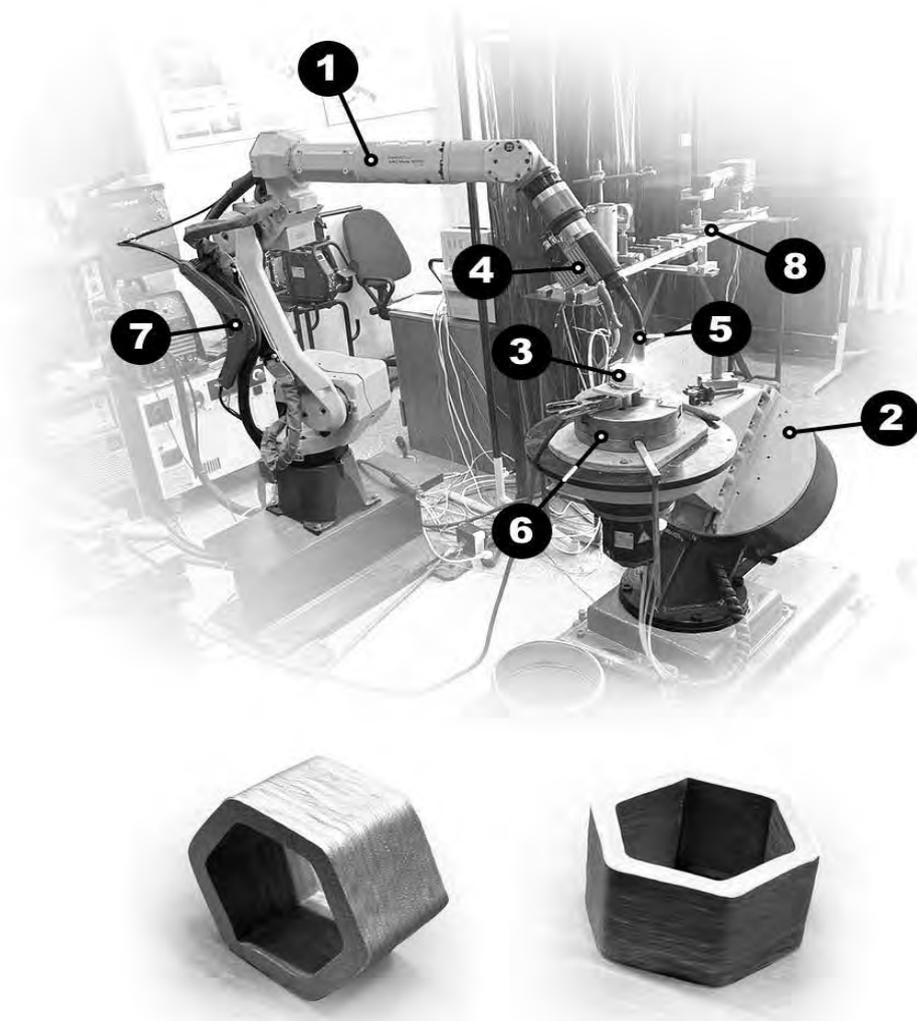


Рис. 1. Внешний вид установки для проведения экспериментальных исследований по аддитивной наплавке материалов на основе робототехнического комплекса и образцов с гексагональным профилем траектории из сплава Al-Si: 1 – робототехнический комплекс; 2 – вращатель-позиционер; 3 – аддитивная наплавка; 4 – блок управления кинетикой подачи присадочной проволоки; 5 – сопло сварочной горелки; 6 – план-шайба для фиксации материала; 7 – блок компенсации реверсивного движения присадочной проволоки; 8 – элементы системы скоростной кинесъемки процесса переноса электродного металла

Исследование микроструктуры проводилось на плоскости, перпендикулярной направлению наплавки. Использовалась механическая вырезка образцов с последующей шлифовкой до необходимого состояния поверхности.

Исследование микроструктуры проводилось с использованием поста микроконтроля МК-1 на базе оптического микроскопа МИ-1 с увеличением до 1500х. Результаты анализа представлены на рис. 2–4.

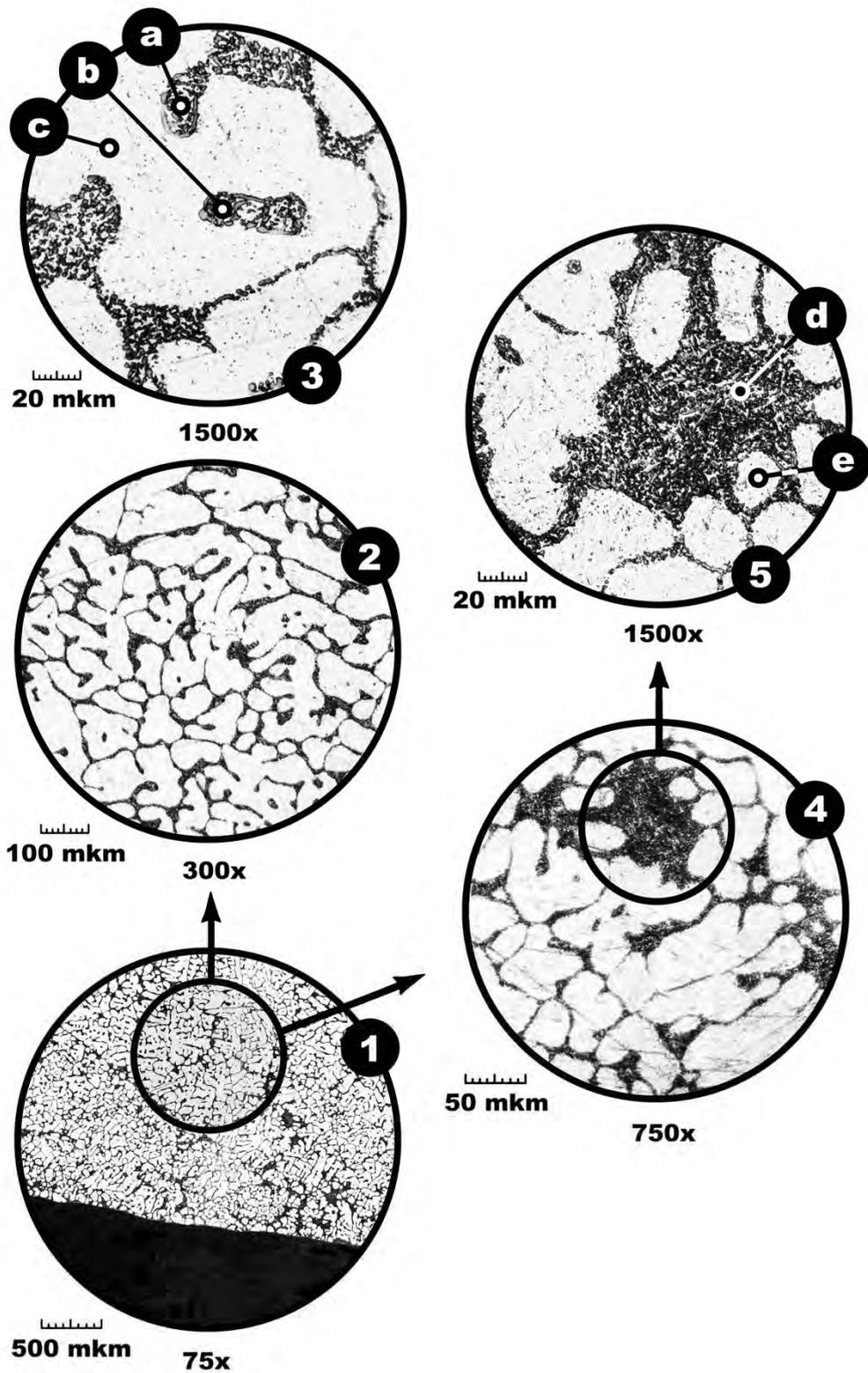


Рис. 2. Результаты микрометаллографических исследований образцов наплавки по традиционной технологии (наплавка толщиной 3,5 мм) (образец 1)

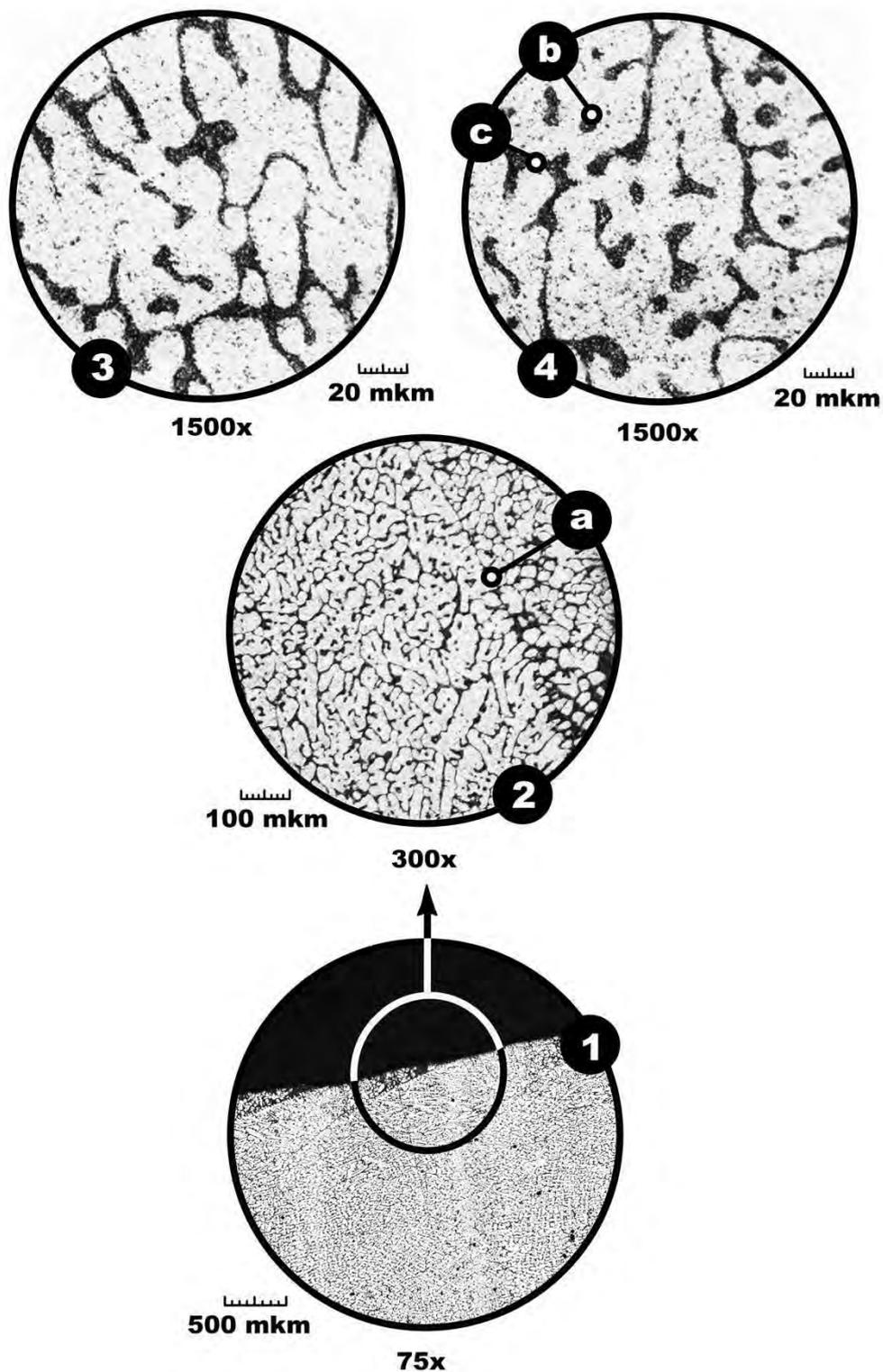


Рис. 3. Результаты микрометаллографических исследований образцов наплавки по традиционной технологии (наплавка толщиной 6 мм) (образец 2)

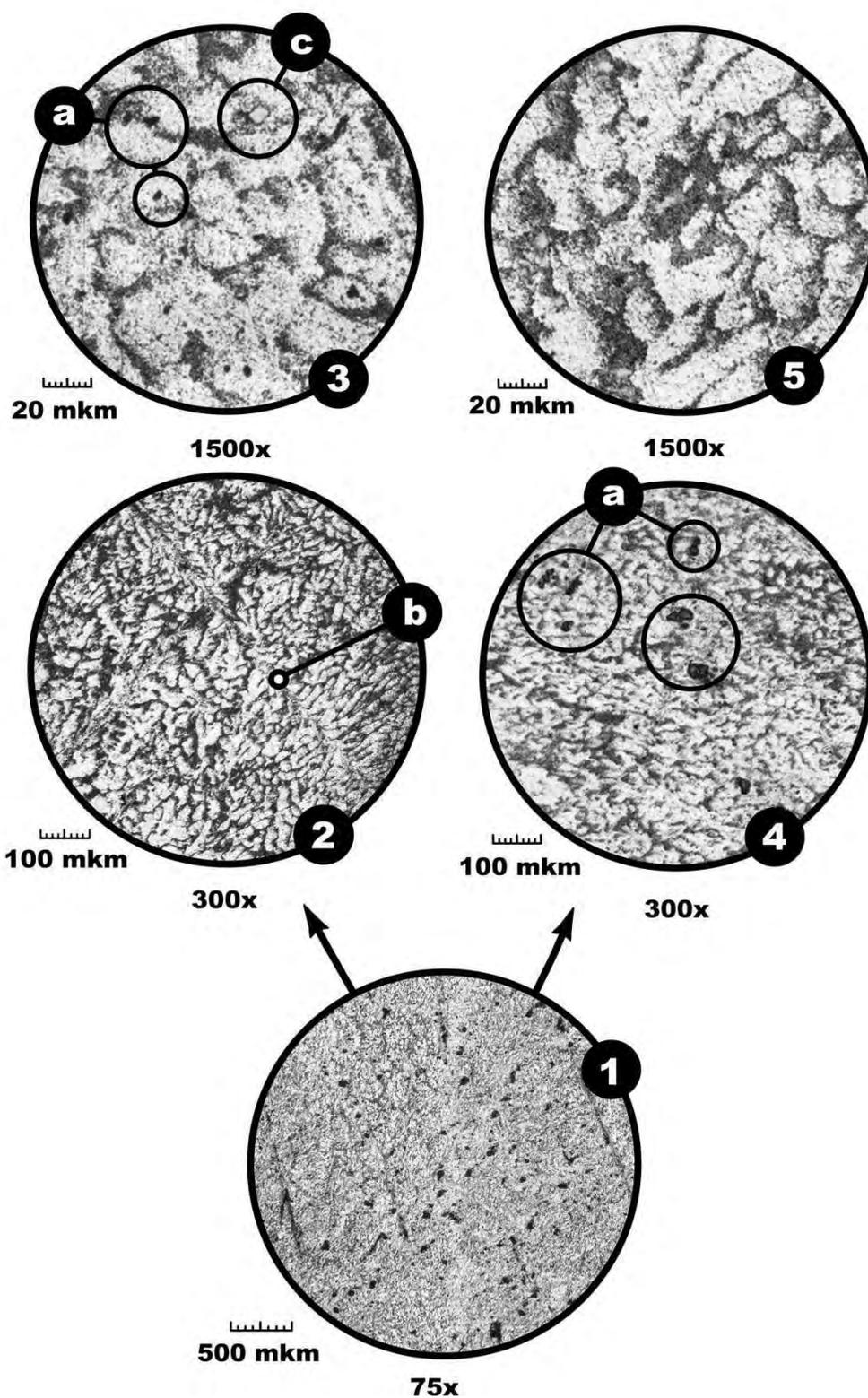


Рис. 4. Результаты микрометаллографических исследований образцов наплавов (3,5 мм) с использованием реверсивной подачи присадочной (образец 3)

Характерной особенностью микро-структуры (см. рис. 2) для образцов, выполненных по традиционной технологии (технология 1), является наличие ярко выраженной эвтектики Al-Si (а) темного цвета, очерчивающей участки α -фазы (Al) (с). Зерна α -фазы (Al) выглядят однородными без крупных выделений первичного кремния (Si). Толщина прослоек эвтектики составляет 3...8 мкм. Также можно зафиксировать в небольшом количестве ее несвязанные участки внутри зерна (b). Несмотря на то, что по химическому составу такие сплавы не распространены с точки зрения промышленно используемых, обнаруженная микро-структура соответствует представлениям о кристаллизации доэвтектических силуминов ($Si < 12,2 \%$).

На оптическом увеличении более 1000х–1500х можно обнаружить дисперсное строение эвтектики и характер распределения участков Si в ней (3, 5). Следует также отметить, что на некоторых участках имеются конгломерации и скопления эвтектик (3, 5) в достаточно крупные прослойки, площадь которых может составлять в среднем до 4000...4500 мкм² (d). При этом участки α -фазы оказываются локализованы в небольших областях 200...250 мкм².

Таким образом, структура в этом случае в рассматриваемых областях представляет каркас из прослоек эвтектик достаточно большой толщины с вкраплениями участков α -фазы.

Изменение мощности тепловложения при наплавке оказывает существенное влияние на формирование микро-структуры. При повышении скорости охлаждения (технология 2) за счет более интенсивного отвода тепла в материал заготовки на микрошлифах наблюдается ярко выраженное измельчение структуры (см. рис. 3). Присутствует большое количество не связанных в непрерывные цепочки элементов эвтектик внутри зерен (b). На границе сплавления отдель-

ных валиков может присутствовать характерная микро-структура с более крупными скоплениями эвтектик Al-Si (а).

Микро-структура наплавов, полученных с использованием реверсивной подачи проволоки (технология 3) и цифрового управления значением силы сварочного тока, представлена на рис. 3. Наблюдается достаточно большое количество крупных включений, относительно равномерно распределенных по площади шлифа. Структура сильно измельчена. По-видимому, благодаря особенностям переноса электродного металла и перехода расплавленной капли с минимальным значением силы сварочного тока, эвтектика не успевает полностью выделиться в виде отдельной фазы и Si рассредоточен по телу зерна. Процесс кристаллизации происходит в неравновесных условиях, что приводит к существенному отклонению от диаграммы состояния Al-Si. Присутствует большое количество первичного кремния, выделяющегося в виде отдельной фазы, упрочняющей зерно при относительном сохранении значений пластичности и относительного удлинения.

Для оценки механических характеристик наплавленного металла были проведены испытания на статическое растяжение и статический изгиб. Угол загиба для всех образцов составил 180° (параллельность сторон), что свидетельствует о достаточной пластичности материала. Результаты испытаний на растяжение представлены в табл. 3.

Анализ полученных результатов показал, что образцы, выполненные с минимальной мощностью тепловложения (технология 3) обладают более высокими значениями предела прочности (157...159 МПа) при сохранении достаточного уровня пластичности ($\approx 17 \%$).

Результаты имеют важное значение, т. к. получаемый аддитивным способом материал наплавки не относится к традиционным сплавам алюминия, используемым в качестве литейных

(содержание Si > 10 %). В рассматриваемом случае количество кремния

невелико (4 %...5 %).

Табл. 3. Результаты механических испытаний на статическое растяжение

Номер образца*	Результат испытаний			Размер образца		
	Ширина, мм	Толщина, мм	Площадь поперечного сечения, мм ²	Относительное удлинение, %	Нагрузка, соответствующая пределу текучести, Н / Предел текучести, Н/мм ²	Разрушающая нагрузка, Н / Временное сопротивление разрыву, Н/мм ²
III-1	21,5	3,6	77,4	17,5	5770 / 74,50	12160 / 157,11
III-2	21,6	3,6	77,7	17,6	7080 / 91,05	12240 / 157,41
III-3	21,4	3,5	74,9	17,2	6000 / 80,11	11930 / 159,28
II-1	22,1	3,7	81,77	10,2	7080 / 86,58	11200 / 136,97
II-2	22,2	3,7	82,14	12,2	7460 / 90,82	11310 / 137,69
II-3	22,3	3,7	82,51	11,4	7010 / 84,95	11890 / 144,10
I-1	20,0	6,0	120	21,7	8340 / 69,5	15150 / 126,25
I-2	20,3	6,0	121,8	19,7	8110 / 66,58	15250 / 125,20
I-3	20,0	5,9	118	21,7	7750 / 65,68	14790 / 125,34

Примечание –* – образцы I – технология 1; образцы II – технология 2; образцы III – технология 3

Таким образом, разработанная технология позволяет создавать принципиально новый материал с контролируемой микроструктурой и свойствами из известных присадочных проволок путем управления тепловложением и скоростью охлаждения наплавки. Дальнейшее развитие предлагаемого способа может быть реализовано путем подачи в зону наплавки двух присадочных проволок различного состава. Независимое цифровое управление источником питания и подающим механизмом позволит создать уникальные материалы на основе интерметаллидного упрочнения.

Выводы

Таким образом, по результатам проведенных экспериментальных исследований установлено.

1. Управление мощностью тепловложения путем изменения значений параметров режима и скорости наплавки при дуговом аддитивном синтезе алю-

миниевых сплавов является эффективным инструментом воздействия на характер формирования микроструктуры. При этом создаются условия для изготовления изделий из сплавов Al-Si с меньшим, по сравнению с традиционными литейными сплавами, содержанием кремния.

2. Si существенно увеличивает жидкотекучесть расплавленной ванны на торце заготовки, что ограничивает диапазон эффективных значений параметров режима. Использование высоких скоростей наплавки связано с удлинением ванны и повышением вероятности нарушения газовой защиты в ее хвостовой части. Эту особенность необходимо учитывать при разработке траектории наплавки.

3. Создание высоких скоростей охлаждения путем снижения силы сварочного тока до экстремально низких значений в момент короткого замыкания дугового промежутка позволяет существенно

измельчить структуру материала и создать неравновесные условия для фиксации кремния в теле зерна алюминия и

блокировки его выхода в эвтектику Al-Si по границам зерен.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коротеев, А. О.** Особенности формирования микроструктуры при аддитивной дуговой наплавке материалов системы легирования Al-Si / А. О. Коротеев // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф.* – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 182.
2. **Шукан, Н. М.** Аддитивный синтез массивных алюминиевых изделий / Н. М. Шукан, А. А. Лопатина // *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых.* – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 97.
3. **Коротеев, А. О.** Особенности адаптации дуговых сварочных технологий для целей аддитивного синтеза алюминиевых сплавов / А. О. Коротеев, Н. М. Шукан, А. А. Коротеева // *Современные материалы, передовые производственные технологии (СМПТТ-2023): сб. тез. Междунар. науч. конф.* – Санкт-Петербург, 2023. – С. 13–15.

Статья сдана в редакцию 24 марта 2024 года

Контакты:

karatseyeu_artur@fastmail.com (Коротеев Артур Олегович);
shukannikolai84@gmail.com (Шукан Николай Михайлович);
piperkaaaa@gmail.com (Клименкова Александра Владимировна);
aleksandranihejkina720@gmail.com (Михейкина Александра Николаевна);
arina.lopatina.2003@mail.ru (Лопатина Арина Алексеевна).

**A. O. KARATSEYEU, N. M. SHUKAN, A. V. KLIMIANKOVA, A. N. MIKHEIKINA,
A. A. LAPATSINA**

FEATURES OF FORMATION OF Al-Si ALLOY MICROSTRUCTURE DURING ADDITIVE SYNTHESIS BASED ON ARC WELDING TECHNOLOGIES (WAAM) WITH CONTROL OF HEAT INPUT POWER

Abstract

Based on experimental studies, features of the formation of Al-Si alloy microstructure during additive arc surfacing were determined, with different heat input powers being used. Surfacing was carried out using a closed hexagonal trajectory on a robotic complex without the use of a rotator. To minimize the heat input power, CMT Fronius technology with reciprocating filler wire feed was used.

Keywords:

additive technologies, arc surfacing, WAAM, microstructure, aluminum alloys, heat input power, mechanical characteristics, control of mode parameters.

For citation:

Features of formation of Al-Si alloy microstructure during additive synthesis based on arc welding technologies (WAAM) with control of heat input power / A. O. Karatseyeu, N. M. Shukan, A. V. Klimiankova, A. N. Mikheikina, A. A. Lapatsina // *Belarusian-Russian University Bulletin.* – 2024. – № 2 (83). – P. 26–35.