

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

苏俊出

Су Чуанчу

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
СПЛАВОВ Al-5Mg и Al-5Si, ПОЛУЧЕННЫХ ПРОВОЛОЧНО-ДУ-
ГОВЫМ АДДИТИВНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНО-
ЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Томск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Научный руководитель:

Коновалов Сергей Валерьевич

доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк.

Официальные оппоненты:

Клопотов Анатолий Анатольевич

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры прикладной механики и материаловедения, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск.

Иванов Юрий Федорович

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск.

Защита состоится «11» декабря 2024 г. в 15-00 ч на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.03 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан « » октября 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета ДС.ТПУ.03

доктор технических наук

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'S.A. Gyngazov'.

Гынгазов С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сплав Al-5Mg (5356) относится к алюминиевым сплавам серии 5xxx. По сравнению со сплавами этой серии сплав Al-5Mg имеет более высокую пластичность, меньшее содержание легирующих элементов и однофазную структуру. Сплавы серии 5xxx обладают хорошей стойкостью к механической и термической коррозии, сопротивлением радиационному набуханию, что делает его пригодным для конструкций и деталей корпусов ядерных реакторов. Сплав Al-5Si (4043) благодаря своей хорошей формовости, высокой удельной прочности и отличной коррозионной стойкости широко используется в авиакосмической промышленности и автомобилестроении. С внедрением аддитивных технологий в производство эти два типа сплавов применяются в качестве объектов для исследований в области послойного аддитивного выращивания. Среди всех технологий получения алюминиевых сплавов, важную роль играет технология проволочно-дугового аддитивного производства (WAAM) на основе холодного переноса металла (СМТ) (WAAM-СМТ). Технология WAAM-СМТ – это аддитивная технология, которая позволяет изготавливать металлические детали сложной формы путем послойного нанесения материалов, используя дугу в качестве источника нагрева и металлическую проволоку в качестве присадочного материала. Данная технология имеет преимущества в виде высокой скорости наплавки, высокого коэффициента использования материала, относительно низкой стоимости производства и стоимости оборудования, высокой гибкости оборудования и масштабируемости. В связи с этим, актуальным является изучение особенностей процесса проволочно-дугового аддитивного производства на основе холодного переноса металла и получение стабильных параметров с целью ускорения промышленного внедрения данной технологии для производства аддитивных изделий из алюминиевых сплавов.

Степень научной разработанности проблемы. Технология аддитивного производства широко используется для изготовления металлических изделий с момента ее разработки в 1980-х годах. В частности, изделия из алюминиевых сплавов производятся с помощью лазерной и электронно-лучевой технологии аддитивного производства, при этом накоплен большой объем данных, доступный для изучения влияния параметров процесса на микроструктуру и свойства алюминиевых сплавов. Вместе с этим влияние параметров процесса WAAM-СМТ на качество формообразования изделий из алюминиевых сплавов Al-5Mg и Al-5Si, изготовленных по этой технологии, исследовано недостаточно.

Цель и задачи. Целью данной работы является определение влияния параметров процесса (режим дуги, скорость подачи проволоки, скорость сварки, стратегия наплавки и высота наплавки) на структуру и механические свойства сплавов Al-5Mg и Al-5Si, полученных методом проволочно-дугового аддитивного производства на основе холодного переноса металла.

Для реализации поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1) Определить влияние различных режимов дуги (СМТ-ADV, СМТ, СМТ-Р) на микроструктуру и механические свойства сплавов Al-5Mg, полученных методом WAAM-СМТ.

2) Установить влияние величины тепловложения, зависящего от скорости подачи проволоки и скорости сварки, на микроструктуру и механические свойства изготовленных сплавов Al-5Mg.

3) Определить особенности влияния различных стратегий наплавки и высоты наплавки на изменение микроструктуры и механических свойств сплавов Al-5Si, полученных методом WAAM-СМТ, и провести углубленные исследования механизма разрушения сплавов Al-5Si.

Научная новизна.

1) Впервые установлено влияние различных режимов дуги (СМТ-Р → СМТ → СМТ-ADV) на изменение микроструктуры и механических свойств сплавов Al-5Mg, полученных методом WAAM-СМТ. Обнаружено, что данная последовательность изменения режимов дуги соответствует уменьшению величины тепловложения, что приводит к измельчению зерна и повышению прочности и твердости сплава.

2) Впервые определено влияние скорости подачи проволоки и скорости сварки в процессе WAAM-СМТ на величину тепловложения сплава как одного из ключевых факторов, вызывающих различия в структуре и механических свойствах сплава Al-5Mg.

3) Впервые показано, что в сплавах Al-5Si, полученных методом WAAM-СМТ, варьирование стратегии наплавки и высоты наплавки изменяет скорость охлаждения сплавов в процессе производства. По результатам анализа определены значения скоростей охлаждения сплавов при различных стратегиях и высотах наплавки, а также установлено влияние различий в скоростях охлаждения на микроструктуру и механические свойства сплавов.

4) Установлено, что сплав Al-5Si, изготовленный методом WAAM-СМТ, разрушается по смешанному механизму, включающему транскристаллитное и интеркристаллитное виды разрушения.

Теоретическая и практическая значимость работы.

- В работе получены экспериментальные данные по влиянию технологических параметров дугового аддитивного производства (режим дуги, скорость подачи проволоки, скорость сварки, стратегия наплавки и высота наплавки) на структуру, фазовый состав и механические свойства сплавов Al-5Mg и Al-5Si. Полученный результат способствует улучшению и обогащению технологической базы данных по дуговому аддитивному производству сплавов Al-Mg и Al-Si и внедрению данной технологии в промышленное изготовление деталей из алюминиевых сплавов.

- На основе работы был получен патент на изобретение «Синергетический метод и устройство для лазерно-дугового композитного аддитивного производства с использованием металлической проволоки и порошка металла» (патент № ZL202110633084.2), который успешно применяется для производства алюминиевых и титановых сплавов, нержавеющей стали, сплавов на основе никеля и других изделий. Изобретение характеризуется возможностью

реализации нескольких режимов аддитивного производства, таких как дуговое аддитивное производство, лазерное аддитивное производство, лазерно-дуговой композитный аддитивный метод и др., путем регулирования горения дуги, состояния лазерного источника тепла, а также управления подачей проволоки и металлического порошка, гибкой настройкой химического состава производимых сплавов. Внедрение данного устройства открывает новые возможности для композитного аддитивного производства лопаток турбин со сложной структурой, металлических топливных элементов, автомобильных кронштейнов и других деталей.

- Результаты работы внедрены в производственный цикл китайской компании «Wenzhou Jinghe Intelligent Manufacturing Science & Technology Co., Ltd.», что позволяет увеличивать выгоду от производства алюминиевых фланцев на 2 млн. рублей в год.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе сплавы Al-5Mg и Al-5Si получены методом WAAM-CMT. Экспериментальные исследования проводились с использованием аналитического и испытательного оборудования кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева и Института лазерного и оптоэлектронного интеллектуального производства Университета Вэньчжоу (КНР). Анализ микротвердости проводился на микротвердомере HVS-1000Z. Макроскопическая структура образцов изучена и проанализирована с помощью 3D лазерного конфокального микроскопа OLS40-SB. Оптический микроскоп (LEICADM-2500M), сканирующий электронный микроскоп Phenom XL и оборудование для дифракции обратного рассеяния электронов (EBSD / Oxford-Nordli-Max 3) использовались для наблюдения и анализа микроструктуры образцов, а также поверхности разрушения образцов при растяжении. Сканирующий электронный микроскоп TESCAN VEGA применялся для анализа состава и микроструктуры образцов. Анализ и идентификацию фаз в сплавах и определение фазового состава проводили на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 ADVANCE.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Технологические режимы, приводящие к существенному снижению тепловложения в наплавляемые слои сплава Al-5Mg: режим CMT-ADV способствует уменьшению тепловложения на 47,3 %, при уменьшении скорости подачи проволоки до 7,0 м/мин – на 12,3 %, а при увеличении скорости сварки до 0,9 м/мин – на 21,9 %, соответственно. Уменьшение тепловложения сплава Al-5Mg при изменении режимов наплавки способствует преобразованию крупных столбчатых зерен в измельченные равноосные зерна, и к увеличению микротвердости, предела прочности и предела текучести.
- 2) Траектория наплавки и высота наплавляемого металла при изготовлении сплава Al-5Si методом проволочно-дугового аддитивного производства на основе холодного переноса металла влияет на величину скорости охлаждения и на качество поверхности. Стратегия «Линия 45°» приводит к получению образцов с наилучшим качеством поверхности.
- 3) Вне зависимости от режима наплавки аддитивный сплав Al-5Mg разрушается

по вязкому механизму, а сплав Al-5Si – по смешанному типу – в области внутри слоя преобладает транскристаллитный механизм, в области на границе между слоями - интеркристаллитный механизм.

4) Все исследуемые режимы получения сплава Al-5Si приводят к рекристаллизации в процессе наплавки и формированию мелкозернистой равноосной структуры в областях на границе между слоями и, в основном столбчатых дендритных зерен в областях внутри слоев, направленных вдоль направления выращивания. С увеличением расстояния от подложки дендритная структура α -Al фазы постепенно превращается в сотоподобные зерна как внутри слоев, так и между ними.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов работы определяется корректностью поставленных задач, использованием апробированных методов, аппаратуры контроля материалов и методик исследования, применяемых в современном физическом материаловедении, большим объемом экспериментальных данных и результатов, полученных совместно с другими исследователями.

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: LXXI Молодежная научная конференция, посвященная 60-летию полета в космос Ю.А. Гагарина, Самара, 2021; XXII Международная научно-практическая конференция «Проблемы прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий - 2021», Новокузнецк, 2021; XXIII Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество», Новокузнецк, 2022; LXVII международная научно-практическая конференция «Технические науки: проблемы и решения», Москва, 2022; XLIX международная научно-практическая конференция «Advances in Science and Technology», Москва, 2022; III Международная научно-практическая конференция «Молодые исследователи за устойчивое развитие», Петрозаводск, 2022; Всероссийская научно-практическая конференция «Всероссийские научные чтения», Петрозаводск, 2022; XI Международной научно-технической конференции «Современные материалы техника и технология», Курск, 2022; XII Международный онлайн симпозиума «Материалы во внешних полях (МВП-23)», Новокузнецк, 2023.

Публикации. Соискатель имеет 22 опубликованные работы по теме диссертации общим объёмом 10,44 печатных листов, из которых 2 работы, опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ, в том числе 7, проиндексированных в международных базах цитирования Scopus, 9 в сборниках трудов международных научно-технических конференций. Получено 4 патента на изобретения. Список основных работ приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора заключается в анализе литературных данных, планировании и проведении экспериментов, проведении испытаний механических свойств, подборе параметров процесса изготовления алюминиевых сплавов с использованием метода WAAM-CMT, обработке и анализе экспериментальных данных, написании статей и тезисов, разработке основных выводов и положений, выносимых на защиту.

Соответствие диссертации специальности. Тема и содержание диссертационной работы соответствует научной специальности 1.3.8 Физика

конденсированного состояния в части пунктов: 1. Экспериментальное изучение физической природы и свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и, в том числе, материалов световодов как в твердом (кристаллы, поликристаллы), так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления; 4. Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами; 6. Установление закономерностей влияния технологии получения и обработки материалов на их структуру, механические, химические и физические свойства, а также технологические свойства изделий, предназначенных для использования в различных областях промышленности и медицины.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и 5 приложений. Полный объем диссертации составляет 144 страниц, включая 57 рисунков и 16 таблицы. Список литературы содержит 145 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, степень ее разработанности, приведены цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, указан личный вклад автора, соответствие паспорту специальности, структура и объем диссертации.

В первой главе «Исследование алюминиевых сплавов, полученных методами технологий аддитивного производства», приводится классификация технологий проволочно-дугового аддитивного производства. Особое внимание уделяется анализу параметров процесса проволочно-дугового аддитивного производства и их влиянию на микроструктуру и механические свойства алюминиевых сплавов в настоящее время. На основе анализа литературных источников формулируются цели и задачи данной работы.

Во второй главе «Материалы, методы и оборудование для исследований» описаны материалы, выбранные в исследовательской работе, оборудование, использованное для изготовления образцов из алюминиевых сплавов, аналитическое оборудование и методы исследования.

В данном эксперименте использовалась проволочно-дуговая аддитивная система наплавки на основе холодного переноса металла (СМТ), состоящая из операционной системы робота FANUC и программного обеспечения для моделирования траектории его движения. В качестве подложек использовались пластины из алюминиевого сплава 6061-Т6 двух размеров: 325 мм × 325 мм × 20 мм и 200 мм × 60 мм × 10 мм. В качестве сырья были выбраны сварочные проволоки из сплавов Al-5Si / ER4043 и Al-5Mg / ER5356 диаметром 1,2 мм. Основные компоненты сплавов перечислены в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав алюминиевого сплава 6061-T6, проволока ER4043 и ER5356 (мас. %)

Состав	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
ER5356	0,25	0,4	0,1	0,25 ~ 0,2	4,5 ~ 5,5	осн.
ER4043	4,5 ~ 6,0	0,8	0,3	0,05	0,05	осн.
6061-T6	0,4 ~ 0,8	0,7	0,15 ~ 0,4	0,15	0,8 ~ 1,2	осн.

Параметры процесса WAAM-CMT, такие как скорость подачи проволоки ($\dot{V}_{\text{пш}}$) и скорость сварки (скорость перемещения сварочной горелки - \dot{V}_c) были определены на основе серии экспериментов по наплавке валиков. Для контроля стабильности сварочной ванны в дуговом режиме и демонстрации различий в течении расплавленного металла в ванне алюминиевого сплава при разных режимах использовалась высокоскоростная камера (рисунок 1). Для изучения процессов проволоочно-дугового аддитивного производства в качестве плавящегося электрода была выбрана сварочная проволока из сплава ER5356 (Al-5Mg) диаметром 1,2 мм. Исследование влияния режима дуги на структуру и механические свойства образцов осуществлялась для режимов CMT-ADV (улучшенный метод CMT), CMT и CMT-P (импульсный метод CMT). В процессе создания образцов методом аддитивного производства $\dot{V}_{\text{пш}}$ и \dot{V}_c для первого слоя были установлены на уровне 7,0 м/мин и 0,6 м/мин соответственно, а для последующих слоев $\dot{V}_{\text{пш}}$ уменьшалась до 5,5 м/мин. Образцы, изготовленные в режимах CMT-ADV, CMT и CMT-P, были обозначены соответственно, как 3-1-1, 3-1-2 и 3-1-3. Значения тока и напряжения, генерируемые в различных режимах дуги при фиксированных параметрах $\dot{V}_{\text{пш}} = 5,5$ м/мин и $\dot{V}_c = 0,6$ м/мин, составляли: CMT-ADV - 92 А, 11,7 В; CMT - 113 А, 13,6 В и CMT- P - 118 А, 17,3 В.

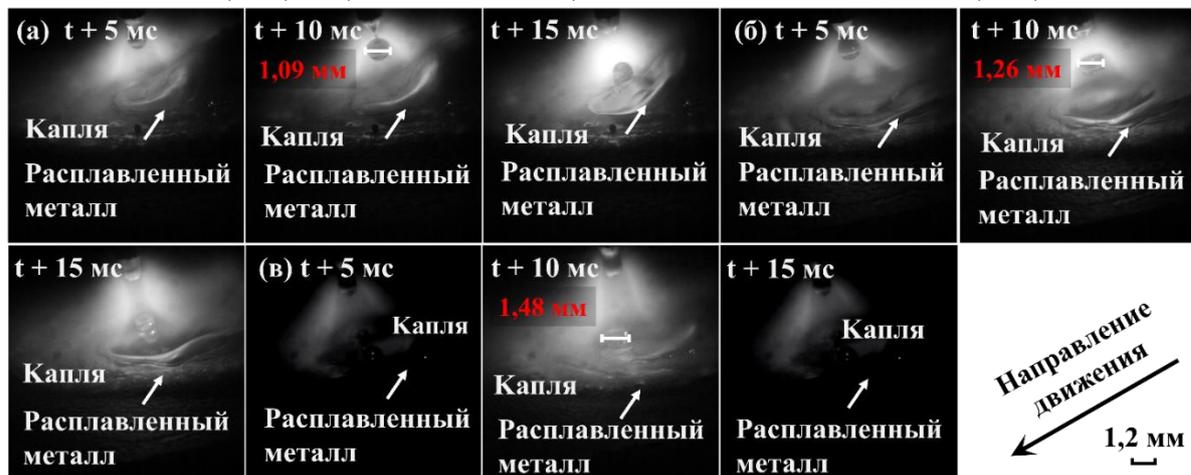


Рисунок 1 – Перенос капель при различных режимах дуги: (а) 3-1-1, режим CMT; (б) 3-1-2, режим CMT-ADV; (в) 3-1-3, режим CMT-P

Для изучения влияния подводимого тепла на структуру и механические свойства образцов, изготовленных методом WAAM-CMT, был использован следующий метод задания технологических параметров: в режиме CMT изменялась $\dot{V}_{\text{пш}}$ и \dot{V}_c для регулировки тепловложения (параметры указаны в таблице 2, значение теплового воздействия определяется уравнением 1).

Таблица 2 – Технологические параметры изготовления сплава Al-5Mg методом WAAM-СМТ при различном тепловложении

№ образца	Ток, А	Напряжение, В	$\vartheta_{\text{шп}}$, м/мин	$\vartheta_{\text{с}}$, м/мин	Расход аргона, л/мин	Тепловложение, Дж/мм
3-2-1	158	16,8	7,0	0,6	20	212,352
3-2-2	168	16,9	7,5	0,6	20	227,136
3-2-3	178	17,0	8,0	0,6	20	242,080
3-2-4	158	16,8	7,0	0,7	20	181,497
3-2-5	158	16,8	7,0	0,8	20	159,663
3-2-6	158	16,8	7,0	0,9	20	141,568

Формула расчета тепловложения выглядит следующим образом:

$$HI = \frac{\eta \times \sum_{i=1}^n I_i U_i}{\vartheta_{\text{с}}} \quad (1)$$

HI – тепловложение, I_i и U_i – ток и напряжение дуги для каждой заготовки, η – термический КПД СМТ режима (его значение принимается равным 0,8), $\vartheta_{\text{с}}$ – скорость сварки (м/мин). Согласно формуле, величина тепловложений возрастает с увеличением $\vartheta_{\text{шп}}$ или уменьшением $\vartheta_{\text{с}}$.

Было разработано программное обеспечение для 3D-моделирования траектории движения горелки, которое используется совместно с операционной системой робота FANUC для планирования и реализации различных траекторий. В эксперименте в качестве присадочного материала использовалась проволока из сплава ER4043 (Al-5Si) диаметром 1,2 мм. $\vartheta_{\text{шп}}$ и $\vartheta_{\text{с}}$ установлены на 5,5 м/мин и 0,6 м/мин, соответственно. Для аддитивного производства сплава Al-5Si использовались три различные стратегии наплавки в режиме СМТ: «Линия 90°», при которой каждый последующий слой наплавляется под углом 90° по отношению к предыдущему, «СЛ 90°», в котором наплавка осуществляется по спирали с углом 90°, и «Линия 45°», при которой каждый последующий слой наплавляется под углом 45° (рисунок 2).

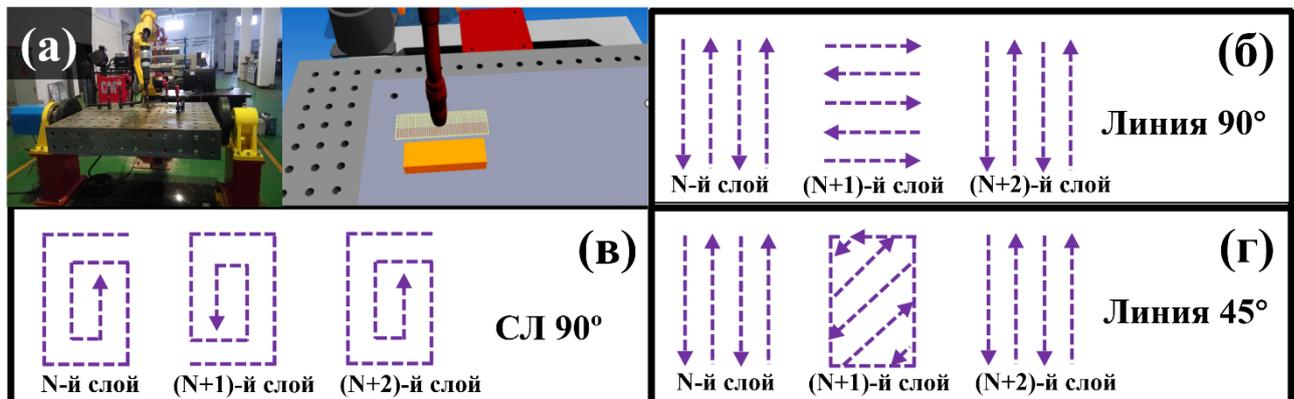
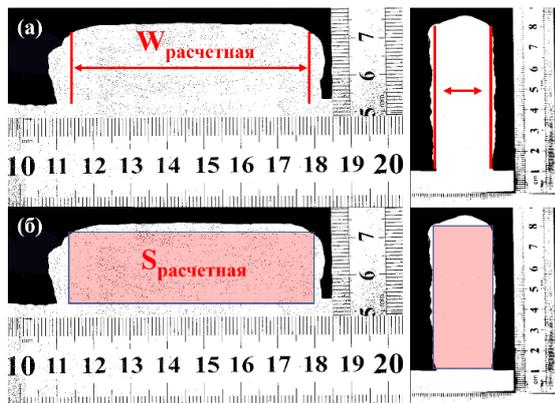


Рисунок 2 – Схемы наплавки сплава Al-5Si: (а) оборудование и программное обеспечение; (б) 4-1-1, Линия 90°; (в) 4-1-1, СЛ 90°; (г) 4-1-3, Линия 45°

Кроме того, для изучения влияния высоты наплавленного слоя на структуру и механические свойства сплава Al-5Si была выбрана стратегия наплавки СЛ 90°,

а размер образца после изготовления составлял 150 мм × 30 мм × 70 мм. Остальные технологические параметры WAAM-CMT установлены следующим образом: защитный газ 99,99 % аргон, скорость подачи газа 20 л/мин (Al-5Mg) и 25 л/мин (Al-5Si). Расстояние между соплом горелки и поверхностью заготовки составляло 15 мм. Приращение по оси Z и время ожидания между слоями были установлены на 2,0 мм и 90 с соответственно, а степень перекрытия наплавочных валиков составила 25 %. Перед проведением экспериментов подложки были очищены ацетоном и стальной щеткой, а проволоки содержались в сухом помещении.

Для сравнения различных параметров макроструктуры образцов из алюминиевого сплава рассматривалось продольное сечение по середине образца и определялись его размеры, как показано на рисунке 3.



$W_{\text{расчетная}}$: расчетная ширина, мм
 $S_{\text{расчетная}}$: расчетная площадь, мм²
 $S_{\text{общ}}$: общая площадь, мм²
 S : расчетный коэффициент
 использования материала
 $S = S_{\text{расчетная}} / S_{\text{общ}}$

Рисунок 3 – Геометрические размеры образцов из алюминиевого сплава: (а)

$W_{\text{расчетная}}$ – расчетная ширина; (б) $S_{\text{расчетная}}$ – расчетная площадь

В третьей главе «Влияние режима дуги, скорости подачи проволоки и скорости сварки на макроструктуру, микроструктуру и механические свойства сплава Al-5Mg, изготовленного методами WAAM-CMT», были подготовлены и исследованы образцы сплава Al-5Mg. Тепловложение является основным фактором, непосредственно влияющим на структуру и механические свойства сплавов. В соответствии с параметрами процесса, определенными в главе 2, и формулой расчета тепловложения (1), тепловложение для каждого режима дуги следующее: CMT-P (163,312 Дж/мм) > CMT (122,944 Дж/мм) > CMT-ADV (86,112 Дж/мм). Кроме того, согласно формуле расчета тепловложения, приведенной в главе 2, видно, что величина $\vartheta_{\text{пл}}$ пропорциональна величине тепловложения, а величина $\vartheta_{\text{с}}$ обратно пропорциональна величине тепловложения. В этой главе образцы сплавов Al-5Mg изготавливаются при различных режимах дуги и разных $\vartheta_{\text{пл}}$ и $\vartheta_{\text{с}}$, чтобы определить их влияние на макроструктуру, микроструктуру и механические свойства. Сравнивая макроструктуру образцов сплава Al-5Mg, изготовленных при различных режимах дуги, показано, что поверхность образцов Al-5Mg, изготовленных при режиме CMT является наиболее плоской и ровной, как показано на рисунок 4а₁ максимальное размер колебаний на поверхности образца составляет 1,34 мм. Поверхность образца Al-5Mg, полученного при режиме CMT-P характеризуется более высоким рельефом между слоями и низкой плоскостностью (максимальное размер колебаний 2,09 мм на рисунок 4а). Расчетная ширина и расчетное использование сформированного

поперечного сечения образца приведены в таблице 3. По сравнению с режимом СМТ-Р расчетная ширина ($W_{\text{расчетная}}$) образца Al-5Mg в дуговых режимах СМТ-ADV и СМТ ниже, а расчетный коэффициент использования материала (S) выше, что составляет 13,51 мм / 87 % и 11,53 мм / 85 % соответственно. $W_{\text{расчетная}}$ и S образца Al-5Mg в дуговом режиме СМТ-Р являются самыми большими и наименьшими - 14,17 мм / 81% соответственно. В дуговом режиме СМТ, $W_{\text{расчетная}}$ увеличивается от 26,6 до 31,7 мм при увеличении скорости подачи проволоки, в то время как плоскостность поверхности образцов уменьшилась. Также с уменьшением скорости сварки расчетная $W_{\text{расчетная}}$ увеличивается от 27,2 до 28,4 мм, а плоскостность поверхности образцов возрастает. Однако расчетный коэффициент использования материала изменяется незначительно, и все его значения превышают 81%.

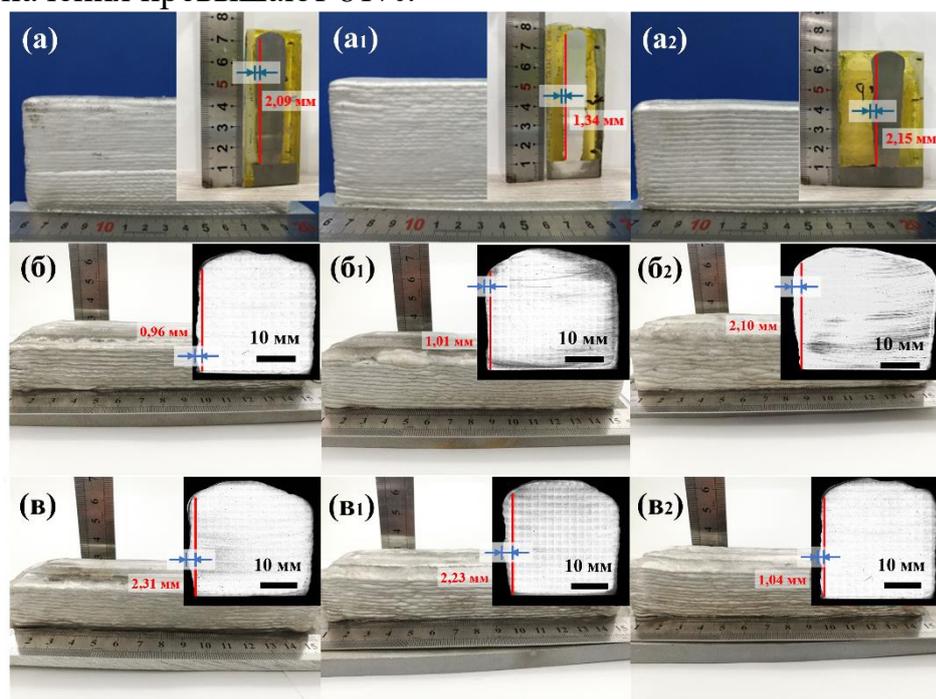


Рисунок 4 -
Макроструктура
образца сплава Al-
5Mg: при
различных режимах
дуги: (а) 3-1-1;
(а₁) 3-1-2; (а₂) 3-1-3;
(б) 3-2-1; (б₁) 3-2-2;
(б₂) 3-2-3; (в) 3-2-4;
(в₁) 3-2-5; (в₂) 3-2-6;

Таблица 3 – Геометрические размеры образца сплава Al-5Mg

№ образца	Режим дуги / тепловложение, Дж/мм	Коэффициент использования материала, %	Расчетная ширина, мм	Расчетная площадь, мм ²
3-1-1	СМТ-ADV	87	13,51	788,98
3-1-2	СМТ	85	11,53	723,85
3-1-3	СМТ-Р	81	14,17	793,23
3-2-1	212,352	81	26,6	717,4
3-2-2	227,136	83	28,5	771,9
3-2-3	242,080	83	31,7	638,81
3-2-4	181,497	82	28,4	704,3
3-2-5	159,663	81	27,8	661,5
3-2-6	141,568	84	27,2	647,5

Анализ фазового состава образца сплава Al-5Mg показывает, что структура сплавов Al-5Mg после WAAM-СМТ в основном представляет собой смесь α -фазы (Al) и β -фазы (Al_3Mg_2) (рисунок 5). Предыдущий наплавленный слой повторно

нагревается следующим слоем в образцах, изготовленных методом WAAM-CMT, что приводит к появлению двух областей – границы между наплавленными слоями (ГМС) и области внутри слоя (ОВС). Поры и трещины можно увидеть в ГМС или вдоль межслойной границы, и эти дефекты напрямую влияют на механические свойства. Размер пор обычно меньше 33,535 мкм, а длина трещин достигает 696,154 мкм. Кроме того, как показано на рисунке 6, существуют также очевидные различия в микроструктуре ГМС и ОВС. Микроструктура в области ГМС образца, представленная на рисунке 6в, содержит небольшое количество столбчатой структуры и большое количество равноосных зерен, в то время как на рисунках 6б и 6г большинство зерен в ОВС имеют крупные размеры и столбчатое строение. При этом небольшое количество удлиненных столбчатых зерен распределено вдоль границы между слоями. В то же время, микроструктура и размеры этих двух областей сильно зависят от режима дуги, а также $\vartheta_{\text{пл}}$ и $\vartheta_{\text{с}}$. При переходе от режимов дуги CMT-ADV и CMT на режим CMT-P тепловложение увеличивается с 145,02 до 195,2 Дж/мм. В связи с большим тепловложением размер зерен образцов сплава Al-5Mg увеличивается с 59,9 - 106,9 до 83,8 - 115,1 мкм в ОВС и с 31,4 - 89,4 до 58,1 - 103,9 мкм в ГМС при изменении режима дуги. Кроме того, в режиме CMT, количество тепловложения увеличивается с увеличением $\vartheta_{\text{пл}}$ или уменьшением $\vartheta_{\text{с}}$. В таблицах 2 и 4 показано, что размер зерен увеличивается в диапазоне от 56,1 - 112,2 до 56,4 - 117,9 мкм в ОВС, от 47,2 - 90,4 до 50,2 - 102,5 мкм в ГМС, соответственно, по мере увеличения $\vartheta_{\text{пл}}$ с 7,0 до 8,0 м/мин, при постоянном значении $\vartheta_{\text{с}} = 0,6$ м/мин. Сравнение размеров зерен при изменении значения $\vartheta_{\text{с}}$ и сохранении других параметров неизменными показывает, что увеличение $\vartheta_{\text{с}}$ вызывает уменьшение тепловложения в наплаваемые слои, что является следствием более быстрого затвердевания и охлаждения сварочной ванны, и значительно замедляет тенденцию роста зерна. Размер равноосных зерен колеблется от 54,5 - 107,7 до 42,9 - 88,7 мкм в ОВС, от 43,2 - 89,3 до 37,7 - 77,6 мкм в ГМС при изменении $\vartheta_{\text{с}}$ с 0,7 м/мин до 0,9 м/мин, ширина столбчатого зерна составляет не более 86,5 мкм в ОВС при $\vartheta_{\text{с}} = 0,7$ м/мин.

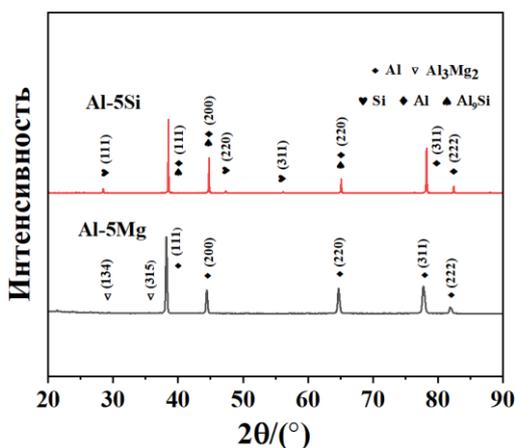


Рисунок 5 – Результаты рентгеноструктурного анализа образцов сплавов Al-5Mg и Al-5Si, изготовленных методом WAAM-CMT

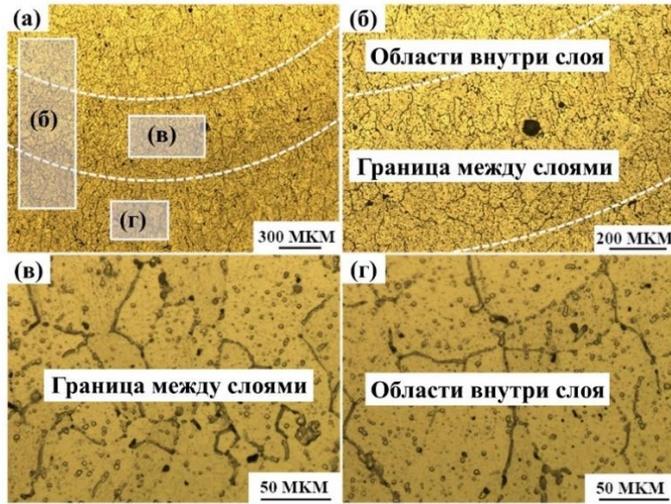


Рисунок 6 –
Микроструктура
образца сплава Al-5Mg,
изготовленного методом
WAAM-CMT:
микроструктуры границы
между слоями (в) и
области внутри слоя (г)

Таблица 4 – Размер зерен образца сплава Al-5Mg в ГМС / ОВС

№ образца	Режим дуги/ Тепловложение, Дж/мм	Область внутри слоя, мкм	Границы между слоями, мкм
3-1-1	CMT-ADV	59,9-106,9	31,4-89,4
3-1-2	CMT	75,9-111,6	54,6-91,3
3-1-3	CMT-P	83,8-115,1	58,1-103,9
3-2-1	212,352	56,1-112,2	47,2-90,4
3-2-2	227,136	56,4-117,9	48,1-93,2
3-2-3	242,080	59,1-119,5	50,2-102,5
3-2-4	181,497	54,5-107,7	43,2-89,3
3-2-5	159,663	44,3-92,4	40,5-82,7
3-2-6	141,568	42,9-88,7	37,7-77,6

На рисунке 7а, б, в показаны графики изменения микротвердости образцов вдоль высоты наплавки при различных режимах дуги и $\vartheta_{\text{пл}}$ и $\vartheta_{\text{с}}$. При трех различных режимах дуги CMT-ADV, CMT и CMT-P микротвердость образца в режиме CMT-ADV выше, чем в двух других режимах, а средние значения микротвердости вдоль вертикального направления составляют $75,71 \pm 0,74$ HV, $71,89 \pm 0,72$ HV и $70,11 \pm 0,75$ HV, соответственно. При изменении $\vartheta_{\text{пл}}$ с 7,0 до 8,0 м/мин средняя твердость уменьшается приблизительно с $76,20 \pm 0,71$ до $70,36 \pm 0,75$ HV. В режиме CMT при изменении $\vartheta_{\text{пл}}$ с 7,0 м/мин на 8,0 м/мин средняя твердость снизилась с $76,20 \pm 0,71$ до $70,36 \pm 0,75$ HV. При изменении $\vartheta_{\text{с}}$, как видно из рисунка 7в, изменение микротвердости составляет около 2 HV. Таким образом, можно заключить, что микротвердость образцов изменяется при изменении основных параметров наплавки, таких как режим дуги, $\vartheta_{\text{пл}}$ и $\vartheta_{\text{с}}$.

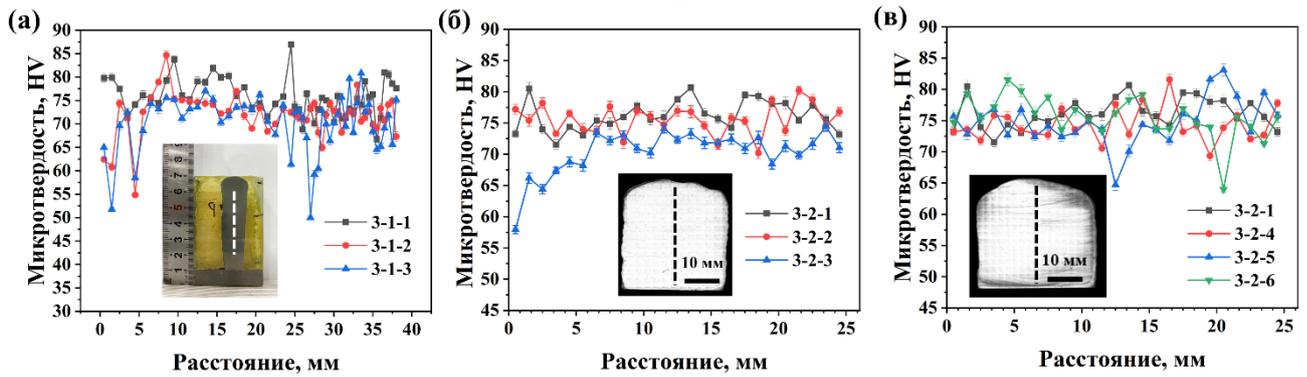


Рисунок 7 – Распределение микротвердости образца сплава Al-5Mg, изготовленного методом WAAM-CMT: (а) микротвердость при различных режимах дуги (б) микротвердость при различных $\vartheta_{\text{пл}}$; (в) микротвердость при различных $\vartheta_{\text{с}}$

Результаты изучения влияния режима дуги, $\vartheta_{\text{пл}}$ и $\vartheta_{\text{с}}$ на механические свойства образцов Al-5Mg показаны в таблице 5. Из таблицы видно, что существуют различия в механических свойствах образцов, вырезанных из разных частей детали (области 1, 2, 3 и 4 на рисунке 8). При сравнении прочности образцов, изготовленных при различных режимах дуги, значения условного предела прочности ($\sigma_{\text{В}}$), предела текучести ($\sigma_{0,2}$) и относительного удлинения (δ) для сплава CMT-ADV составляют приблизительно $\sigma_{\text{В}}$: ~ 248,2 МПа, $\sigma_{0,2}$: ~ 110,1 МПа и δ : ~ 20,7 % в образцах, вырезанных из области 1 (рисунок 8б). С изменением режима дуги (CMT-ADV → CMT → CMT-P) прочность уменьшается, а относительное удлинение увеличивается. В отличие от сплава, произведенного в режиме CMT-ADV, сплав в режиме CMT показывает снижение $\sigma_{\text{В}}$ и $\sigma_{0,2}$ с улучшением пластичности. Интересно отметить, что по сравнению со сплавом в режиме CMT относительное удлинение сплава в режиме CMT-P увеличивается на 10,3 % при снижении прочности. При сравнении предела прочности образцов, изготовленных в режиме CMT с различными условиями $\vartheta_{\text{пл}}$ and $\vartheta_{\text{с}}$, $\sigma_{\text{В}}$ этих образцов составляет около 255 ± 5 МПа. $\sigma_{\text{В}}$ имеет тенденцию к увеличению с увеличением $\vartheta_{\text{с}}$ с 252,0 МПа до 262,0 МПа в области 3 и с 249,0 до 259,0 МПа в области 4 (рисунок 8в). Однако по отношению к относительному удлинению наблюдается тенденция к снижению с 26,4 до 23,2 % в области 3 и с 24,4 до 21,6 % в области 4 с увеличением $\vartheta_{\text{с}}$. Кроме того, также наблюдается, что увеличение $\vartheta_{\text{пл}}$ приводит к снижению $\sigma_{\text{В}}$ на 1 ~ 3 %, снижению $\sigma_{0,2}$ на 8 ~ 10 % и увеличению относительного удлинения на 10 ~ 17 % как в области 3, так и в области 4. В целом, из полученных результатов механических испытаний на растяжение следует, что детали из сплава Al-5Mg, изготовленного по методу WAAM-CMT, имеют лучшие характеристики, чем детали из литого сплава Al-5Mg ($\sigma_{\text{В}}$: ~ 202,35 МПа, $\sigma_{0,2}$: ~ 87,16 МПа, δ : ~ 23,78 %). Все образцы имеют структуру вязкого излома, характеризующуюся наличием сетки из ямок с большим количеством частиц второй фазы, распределенных внутри этих ямок (рисунок 8а).

Таблица 5 – Механические свойства образцов сплава Al-5Mg, изготовленного методом WAAM-CMT

№ образца	Область 1			Область 2		
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
3-1-1	248,2±5	110,1±5	20,7±1	215,5±3	105,6±6	11,8±0,5
3-1-2	245,6±8	107,6±7	22,4±0,6	212,5±5	101,3±4	10,6±0,4
3-1-3	235,6±3	96,4±6	24,7±0,3	209,3±5	95,6±6	9,7±0,8
№ образца	Область 3			Область 4		
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
3-2-1	257,7±5	128±3	20,2±1	252,0±6	127±4	23,6±0,6
3-2-2	253,7±7	127±1	23,1±0,5	250,3±10	126±7	24,5±1
3-2-3	251,0±4	115±7	25,6±1,2	249,5±4	115,7±8	26,2±0,8
3-2-4	252,0±8	119±4	26,4±1	249,0±6	128±3	24,4±0,6
3-2-5	257,0±3	128±3	25,2±0,8	255,0±5	130±9	23,2±0,4
3-2-6	262,0±5	131±5	23,2±0,2	259,0±7	141±5	21,6±0,5

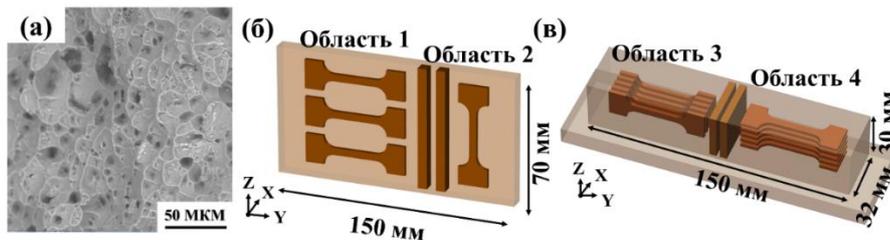


Рисунок 8 – (а) поверхность излома; (б, в) модели расположения образцов для вырезания из образца сплава Al-5Mg

В четвертой главе «Влияние стратегий наплавки и высоты наплавки на макроструктуру, микроструктуру и механические свойства сплава Al-5Si, изготовленного методом WAAM-CMT» изучены структурные и механические свойства сплавов Al-5Si.

Макроструктура сплавов Al-5Si, полученных с использованием стратегии Линия 90° в режиме CMT, характеризуется большой рельефностью и низкой плоскостностью (максимальное размер колебаний 5,18 мм на рисунок 9а), и значения $W_{\text{расчетная}}$ и S для образца составляет, соответственно, 31,7 мм и 83 %. Однако при изменении стратегии наплавки на стратегию Линия 45° качество поверхности образца Al-5Si улучшается, и значение $W_{\text{расчетная}}$ изменяется до 26,6 мм с расчетным коэффициентом использования материала (S) 81 %. Кроме того, с увеличением расстояния от подложки ширина образцов увеличивается с 26,5 до 29,6 мм, а максимальный размер колебаний поверхности образца возрастает в 1,1 раза и S для образца Al-5Si более 85 %, достигая максимального значения 90 % в среднем регионе. С учетом этих результатов можно сказать, что стратегии наплавки и высоты наплавки в режиме CMT напрямую влияют на эффективность использования материала и оказывают большое влияние на поверхность образца Al-5Si (рисунок 9г).

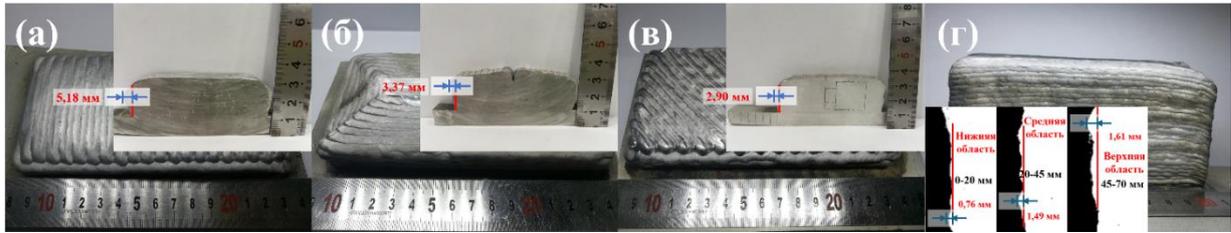


Рисунок 9 - Макроструктура образцов сплава Al-5Si при различных траекториях наплавки: (а) 4-1-1, Линия 90°; (б) 4-1-2, СЛ 90°; (в) 4-1-3, Линия 45°; (г) 4-2, образец сплава Al-5Si

Таблица 6 – Геометрические размеры образцов сплава Al-5Si

№ образца	Стратегии/высота наплавки	Коэффициент использования материала, %	Расчетная ширина, мм	Расчетная площадь, мм ²
4-1-1	Линия 90°	83	31,7	638,81
4-1-2	СЛ 90°	83	28,5	771,9
4-1-3	Линия 45°	81	26,6	717,4
4-2	Нижняя область	86	26,5	768,8
4-2	Средняя область	90	28,2	732,9
4-2	Верхняя область	87	29,6	702,8

Известно, что наиболее важными параметрами, влияющими на кристаллизацию, являются температурный градиент (G) и скорость затвердевания (R). Более того, параметр $G \times R$ (представляющий скорость охлаждения) определяет измельченность микроструктуры, где с увеличением $G \times R$ ожидается последовательное формирование более мелкозернистых структур. Для оценки размера зерна измеряется и рассчитываются пространство между дендритными рукавами, или клетчатость зерна, и скорость охлаждения сплавов Al-5Si. Средний размер длины (d) впоследствии вычисляется с использованием уравнения 2, и характерная скорость охлаждения может быть выражена эмпирической формулой (уравнение 3). Уравнения 2 и 3 приводятся ниже:

$$d = \frac{L_s N_c + L_c N_s}{2 N_c N_s} \quad (2); \quad R = \left(\frac{d}{B}\right)^{-1/n} \quad (3)$$

где L_s – длина в мкм и N_s – количество промежутков между осями дендритов, L_c – длина ячеистых зерен и N_c – количество ячеистых зерен, R – скорость охлаждения (К/с), а для сплава Al-5Si константы B и n составляли 50 мм (К/с)ⁿ и 0,33.

Результаты показывают, что средний размер d образцов Al-5Si в режиме СМТ составляет около 12,34 мкм в процессе Линия 90°, 9,84 мкм в процессе СЛ 90° и 9,23 мкм в процессе Линия 45°. Соответствующие скорости охлаждения показывают возрастающий тренд, а именно: Линия 90°: 69,92 К/с, СЛ 90°: 161,55 К/с и Линия 45°: 179,37 К/с. Средний размер зерна в области (ГМС/ОВС) образца сплавов Al-5Si составляет 62,62 мкм в процессе Линия 90°, 52,86 мкм в процессе СЛ 90°, 43,04 мкм в процессе Линия 45°, соответственно, что измеряется методом обратного рассеяния электронов (ДОРЭ). Как видно по полюсным фигурам (100) на рисунке 10, равноосные зерна, появляющиеся вдоль ГМС, удлинены в соседних ОВС (рисунок 10а, б, в), и динамическая рекристаллизация с различной степенью происходит во всех наплавленных образцах (рисунок 10а₁, б₁, в₁). В частности,

степень динамической рекристаллизации сплава Al-5Si при стратегии Линия 45° является наиболее интенсивной. Этот результат дополнительно подтверждает, что образцы, полученные при стратегии Линия 45°, имеют наименьший размер зерна среди трех стратегий. Что касается микроструктуры образцов по высоте наплавки, в нижних областях в данном исследовании средний размер зерен составляет приблизительно 8,25 мкм в ГМС и 8,84 мкм в ОВС на протяжении 7 нанесенных слоев при средней скорости охлаждения 211,36 К/с. В отличие от этого в верхних областях образца наблюдается более высокая средняя скорость охлаждения, составляющая 242,60 К/с, что сопровождается уменьшением размера зерен (d : 7,95 мкм в ГМС и 8,38 мкм в ОВС). Кроме того, согласно результатам рентгеноструктурного анализа (XRD), преобладающими фазами в образцах Al-5Si являются α -Al, фаза Si и интерметаллидная фаза Al₃Si (рисунке 5) и с увеличением расстояния от подложки дендритная морфология фазы α -Al постепенно превращается в сотоподобные зерна как внутри слоев, так и между ними. Эвтектическая фаза Si значительно укрупнена и имеет сферическую или квадратную форму вдоль границы зерен (рисунке 11). Результаты исследования различных микроструктур показывают, что при постоянных параметрах процесса изменение только стратегии и высоты наплавки приводит к различной накопленной теплоте в слоях. При изменении стратегии с Линия 90° на Линия 45° или увеличении высоты наплавки заметно ускоряются процессы затвердевания и охлаждения ванны расплава, что приводит к получению более мелкозернистых микроструктур.

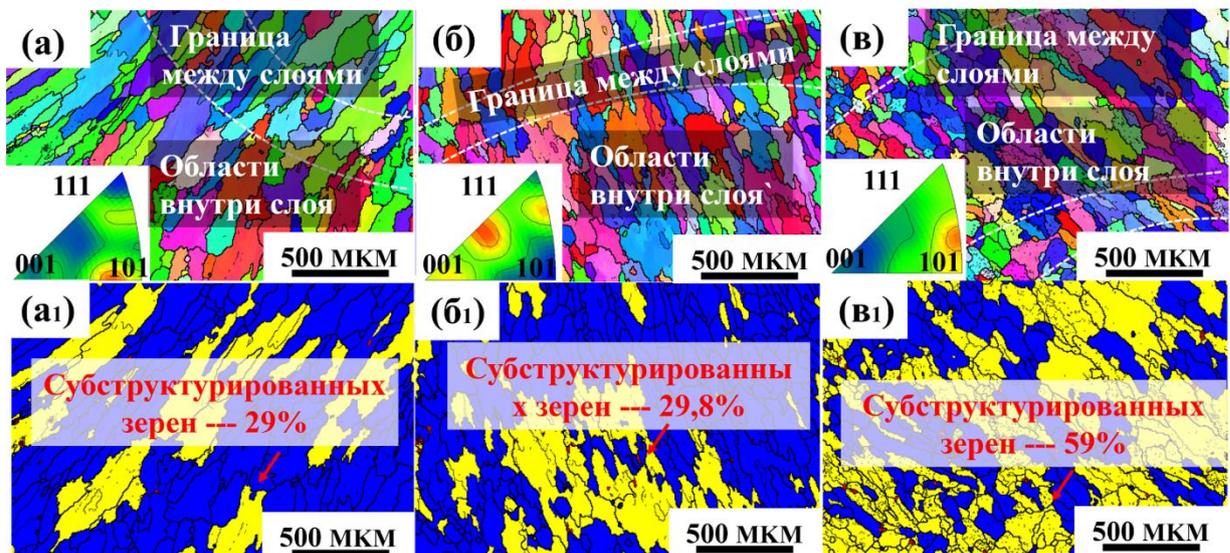


Рисунок 10 - Анализ микроструктуры образцов сплава Al-5Si с помощью ДОРЭ, изготовленного методом WAAM-СМТ при различных траекториях электродугового выращивания: (а, а₁) 4-1-1, Линия 90°; (б, б₁) 4-1-2, СЛ 90°; (в, в₁) 4-1-3, Линия 45°

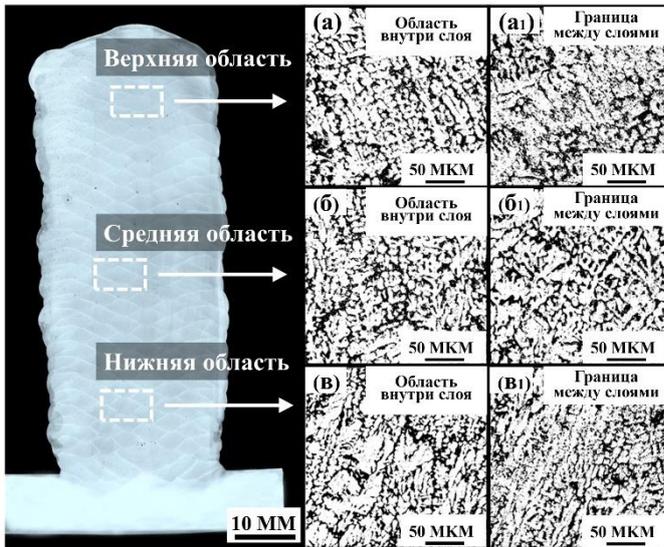


Рисунок 11 – Микроструктура образца сплава Al-5Si: (а, а₁) верхняя область, (б, б₂) средняя область, (в, в₁) нижняя область

Результаты испытаний микротвердости показывают, что вдоль высоты наплавки образцов Al-5Si, изготовленных по стратегии Линия 45° среднее значение микротвердости составляет $55,7 \pm 0,64$ HV, при стратегии СЛ 90° - $51,7 \pm 0,60$ HV, и при стратегии Линия 90° - $48,8 \pm 0,64$ HV. По сравнению со средним значением микротвердости образца СЛ 90°, значение увеличивается на 14,1% при использовании стратегии Линия 45°. В то же время, как видно из рисунка 13, значение микротвердости периодически изменяется в зависимости от расстояния от подложки. Среднее значение микротвердости верхней части образца составляет $50,7 \pm 0,75$ HV, среднее значение микротвердости средней части образца - $48,5 \pm 0,77$ HV и среднее значение микротвердости нижней части образца - $47,3 \pm 0,70$ HV (рисунок 13а). Можно сделать вывод, что изменение стратегии электродугового выращивания и расстояние от подложки может существенно влиять на микротвердость сплава WAAM-CMT Al-5Si. В разных участках образца размер зерен в ГМС меньше, чем в областях внутри слоя, и, следовательно, микротвердость относительно выше (рисунок 12б₁, б₂). Аналогичным образом, в верхних областях образца значения микротвердости, будь то в ГМС или ОВС, выше из-за образования более мелких зерен (рисунок 12б₃, б₄), что обусловлено более высокой скоростью охлаждения и меньшим тепловым накоплением по сравнению со средней областью. Однако значение микротвердости выше в области, расположенной близко к подложке. Это в основном связано с теплопроводностью подложки, в результате чего образец в этой области испытывает более высокую скорость охлаждения. При этом наличие пор приводит к снижению значений микротвердости, а наличие мелкозернистой микроструктуры увеличивает эти значения, особенно в ГМС (рисунок 13б).

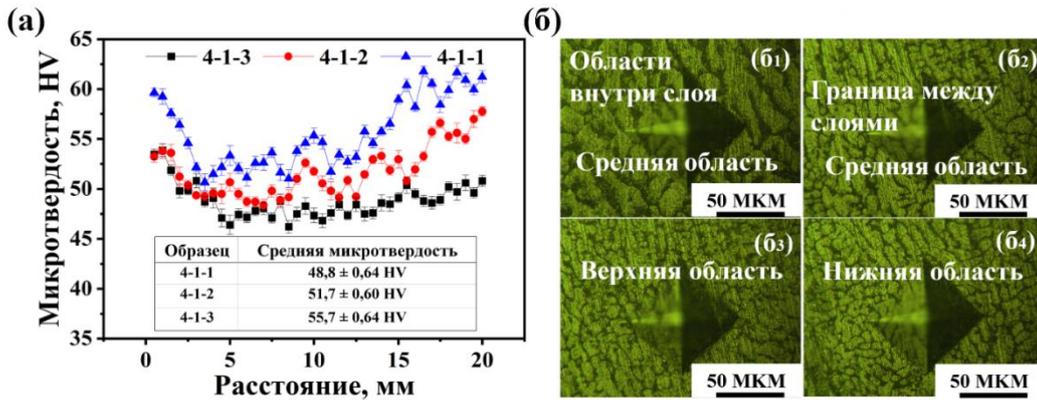


Рисунок 12 – Распределение микротвердости образцов сплава Al-5Si, изготовленных методом WAAM-CMT: (а) по высоте наплавки образца: в ОВС (б₁) и ГМС (б₂), в верхней (б₃) и нижней (б₄) областях

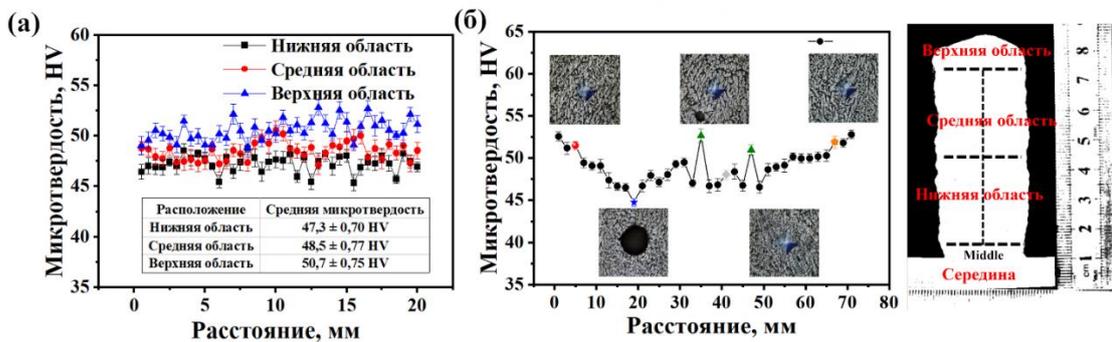


Рисунок 13 – Распределение микротвердости образцов сплава Al-5Si, изготовленных методом WAAM-CMT: (а) по ширине образца; (б) по высоте образца

Результаты механических испытаний на растяжение образцов, полученных при различных стратегиях электродугового выращивания, показывают (таблица 7), что по сравнению с образцами, изготовленными по стратегии Линия 90° ($\sigma_B \sim 205,2$ МПа, $\sigma_{0,2} \sim 132,1$ МПа, $\delta \sim 11,6$ %), образцы, выращенные по траектории Линия 45° обладают отличной прочностью, но меньшим относительным удлинением ($\sigma_B \sim 223,2$ МПа, $\sigma_{0,2} \sim 141,8$ МПа, $\delta \sim 10,6$ %) из-за их мелкозернистой структуры, вызванной более высокой скоростью охлаждения. Точно так же из-за более мелкозернистой структуры, предел прочности образцов увеличивается по мере увеличения расстояния от подложки (рисунок 14в) на 6,6 МПа с 205,6 до 212,2 МПа. Предел текучести также увеличивается с 130,9 до 134,4 МПа, при этом относительное удлинение уменьшается на 1,3 %. Анализ результатов растяжения показывает, что увеличение высоты наплавки улучшает пластические свойства сплавов Al-5Si. Кроме того, среди всех образцов отмечаются более высокие значения σ_B , $\sigma_{0,2}$ и более низкое значение относительного удлинения в области 5, по сравнению с областью 6 (рисунок 14б). Фрактография поверхности разрушения образцов после растяжения показывает, что деформация происходила по вязкому механизму. В ямках встречаются крупные частицы второй фазы (Al_9Si), и на поверхности разрушения видно большое число пор (рисунок 14а).

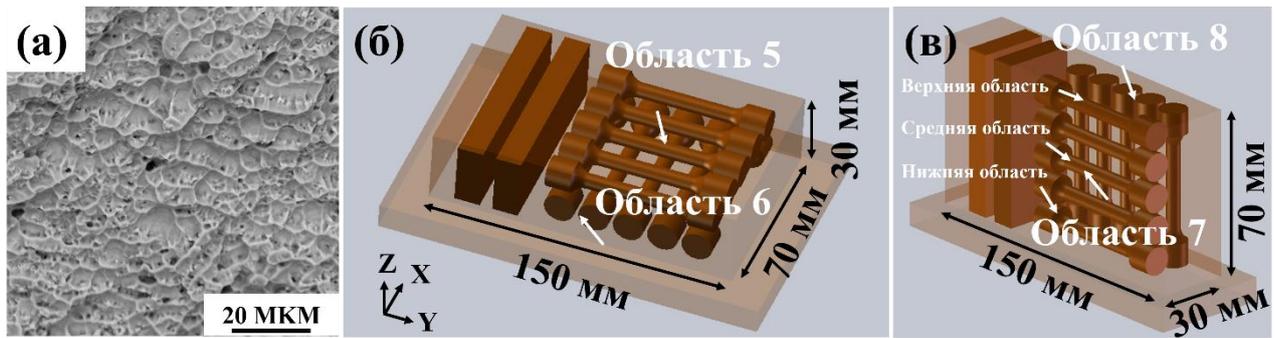


Рисунок 14 – (а) поверхность излома; (б, в) расположение образцов сплава Al-5Si
 Таблица 7 – Механические свойства образцов сплава Al-5Si, изготовленного

методом WAAM-CMT

№ образца	Область 5			Область 6		
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
4-1-1	208,7±2,9	130,9±3	11,4±1,6	201,6±6	133,2±2	11,8±1,6
4-1-2	226,4±10	134,4±3	10,7±0,8	214,6±3	148,5±5	11,3±0,6
4-1-3	228,2±1,4	143,3±7	10,3±0,7	218,1±2	140,3±2	10,8±1,8
Образец	Область 7			Область 8		
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Нижняя область	205,6±4	130,9±5	11,3±0,3	207,2±6	128,5±4	11,2±0,5
Средняя область	208,7±5	130,8±3	10,8±0,2			
Верхняя область	212,2±8	134,4±4	10,1±0,5			

На рисунке 15 приведены изображения поверхностей разрушения образцов сплава Al-5Si, полученных с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии (рисунок 14б). Образцы изготовлены при помощи стратегии наплавки Линия 45°. Образцы, вырезанные из заготовки в областях 5 и 6 демонстрируют признаки разрушения смешанного типа. Результаты показывают, что в областях внутри слоя разрушение происходит по внутризеренному механизму (транскристаллитное разрушение), в то время как в области границы между слоями разрушение происходит по границам зерен (интеркристаллитное разрушение). При этом на поверхности разрушения образцов наблюдаются пустоты, поры и трещины. В ГМС наблюдается большее количество пор и микротрещин, с более крупными размерами, по сравнению с ОВС, что указывает на то, что с большей вероятностью разрушение произойдет в этой области (рисунок 15б, б₁, б₂ и б₃). При деформации по мере того, как микротрещины последовательно проникают в поры, образуется направление развития трещины, которое сопровождается большим количеством отклоняющихся микротрещин.

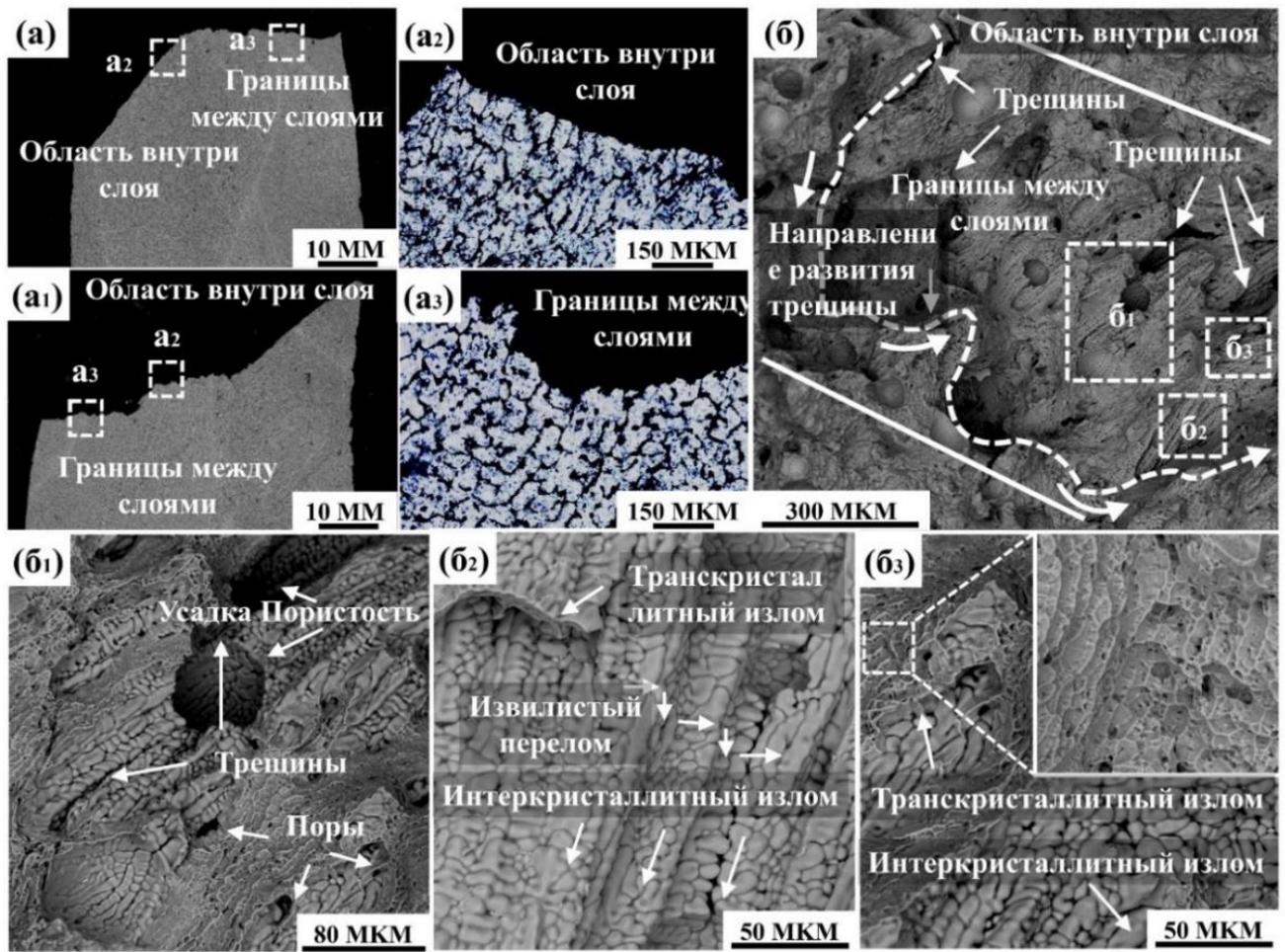


Рисунок 15 – Фрактография поверхности образцов сплава Al-5Si, наплавленных по Линия 45°

В пятой главе «Апробация результатов экспериментальных исследований» представлены примеры применения результатов диссертационной работы в производственных условиях и научно-образовательном процессе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования с использованием методов физики конденсированного состояния установлено влияние различных процессов наплавки (режим дуги, скорость подачи проволоки ($\vartheta_{\text{пл}}$), скорость сварки ($\vartheta_{\text{с}}$), стратегия наплавки, высота наплавки) на структуру и механические свойства сплавов Al-5Mg и Al-5Si, изготовленных методом проволоочно-дугового аддитивного производства на основе холодного переноса металла. На основании полученных результатов были сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что величина тепловложения в наплавляемые слои сплава Al-5Mg уменьшается в следующих случаях: при переходе от режимов СМТ-Р, СМТ к СМТ-ADV на 47,3 %, при уменьшении скорости подачи проволоки с 8,0 до 7,0 м/мин на 12,3 % и увеличении скорости сварки с 0,7 до 0,9 м/мин на 21,9 %. Это приводит к уменьшению расчетной ширины образца на 5,1 мм (при уменьшении скорости подачи проволоки), расчетный максимальный размер колебаний

поверхности образца уменьшается на 1,27 мм (при увеличении скорости сварки), а также повышает коэффициент использования материала до 87 % (в режиме СМТ-ADV).

2. Микроструктурный анализ сплава Al-5Mg показал, что независимо от режима дуги, а также $\vartheta_{\text{пл}}$ и $\vartheta_{\text{с}}$, в сплаве Al-5Mg образуется α -фаза (Al) и вторичная β -фаза (Al_3Mg_2). В связи с термическим воздействием дуги в сплаве образуются 2 характерные области: граница между наплавленными слоями (ГМС) и область внутри слоя (ОВС). Размер зерна в ГМС меньше, чем в ОВС на 22,17%, что связано с более высокой скоростью охлаждения ГМС под тепловым воздействием дуги. В области ГМС присутствуют дефекты: размеры пор обычно составляют менее 33,535 мкм, а длина трещин достигает 696,154 мкм.

3. Показано, что механические свойства сплава Al-5Mg незначительно увеличиваются при смене режимов наплавки от СМТ-Р, СМТ к СМТ-ADV: предел прочности увеличивается на 12,6 МПа, предел текучести — на 13,7 МПа, а микротвердость - на 5,6 НV, что обусловлено снижением величины тепловложения на и уменьшением размера зерен в ГМС с 58,1 - 103,9 до 31,4 - 89,4 мкм, а в ОВС с 83,8 - 115,1 до 59,9 - 106,9 мкм.

4. Установлено, что при увеличении скорости аддитивной наплавки с 0,7 до 0,9 м/мин или уменьшении скорости подачи проволоки с 8,0 до 7,0 м/мин при аддитивном производстве сплава Al-5Mg тепловложение снижается с 242 Дж/мм до 142 Дж/мм. Это приводит к уменьшению размеров зерен сплава в ГМС с 50,2 - 102,5 до 37,7 - 77,6 мкм, а в ОВС: с 59,1 - 119,5 до 42,9 - 88,7 мкм, что, в свою очередь, приводит к увеличению микротвердости на 6 НV, увеличению предела прочности на 4 % и увеличению предела текучести на 17,6 %.

5. Выявлено влияние стратегии наплавки и высоты наплавляемой заготовки при производстве сплава Al-5Si методом WAAM-СМТ на величину скорости охлаждения. При стратегиях наплавки Линия 45°, СЛ 90° и Линия 90° скорости охлаждения составляют 179,37 К/с; 161,55 К/с; 69,92 К/с, соответственно. Установлено, что скорость охлаждения увеличивается с 211,36 до 242,6 К/с при переходе от нижней области к верхней.

6. В результате анализа микроструктуры сплава Al-5Si установлено наличие фаз α -Al, Si и Al_9Si независимо от режима дуги и параметров наплавки. Фаза α -Al изменяет дендритную морфологию на сотовые зерна с удалением от подложки. Эвтектическая Si-фаза увеличивается и формирует сферические или квадратные образования по границам зерен.

7. Показано, что из трех стратегий наплавки, Al-5Si сплав, обработанный по стратегии Линия 45°, демонстрирует минимальный размер зерен (43 мкм), а также максимальные значения предела прочности ($228,2 \pm 1,4$ МПа) и предела текучести ($143,3 \pm 7$ МПа). В верхней области образца наблюдается увеличение предела прочности на 6,6 МПа и предела текучести на 3,5 МПа по сравнению с нижней областью, что обусловлено более высокой скоростью охлаждения и меньшим размером зерна.

8. С помощью фрактографии поверхности излома установлено, что, вне зависимости от режима наплавки, сплав Al-5Mg характеризуется вязким механизмом разрушения, а сплав Al-5Si разрушается по смешанному типу:

транскристаллитное разрушение преобладает в ОВС, а интеркристаллитное – в ГМС.

9. Научно-технологические результаты диссертационной работы по разработке процессов проволоочно-дугового аддитивного производства на основе холодного переноса металла для получения изделий из алюминиевых сплавов были апробированы и использованы на производственных предприятиях Китайской Народной Республики.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

*Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях,
определенных ВАК РФ и индексируемых в международных базах данных
Scopus и Web of Science*

1. Chen, X. Cold metal transfer (CMT) based wire and arc additive manufacture (WAAM) system [Text] / X. Chen, C. Su, Y. Wang, A. N. Siddiquee, K. Sergey, S. Jayalakshmi, R. A. Singh // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2018. – Vol. 12. – P. 1278-1284. (0,438 п.л./ 0,0625 п.л.). (Scopus)
2. Su, C. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloys fabricated by WAAM [Text] / C. Su, X. Chen, C. Gao, Y. Wang // Applied Surface Science. – 2019. – Vol. 486. – P. 431-440. (0,625 п.л./ 0,156 п.л.). (Scopus)
3. Wang, Y. In-situ wire-feed additive manufacturing of Cu-Al alloy by addition of silicon [Text] / Y. Wang, X. Chen, S. Konovalov, C. Su, A. N. Siddiquee, N. Gangil // Applied Surface Science. – 2019. – Vol. 487. – P. 1366-1375. (0,625 п.л./ 0,104 п.л.). (Scopus)
4. Wang, Y. Microstructure and Mechanical Properties of Cu-6.5% Al Alloy Deposited by Wire Arc Additive Manufacturing [Text] / Y. Wang, C. Su, S. Konovalov // Metallography, Microstructure, and Analysis. – 2021. – Vol. 10. – P. 634-641. (0,5 п.л./ 0,167 п.л.). (Scopus)
5. Su, C. Effect of deposition strategies on the microstructure and tensile properties of wire arc additive manufactured Al-5Si alloys [Text] / C. Su, X. Chen, S. Konovalov, R. Arvind Singh, S. Jayalakshmi, L. Huang // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2021. – Vol. 30. – P. 2136-2146. (0,688 п.л./ 0,115 п.л.). (Scopus)
6. Su, C. Effect of depositing torch angle on the first layer of wire arc additive manufacture using cold metal transfer (CMT) [Text] / C. Su, X. Chen // Industrial Robot: the international journal of robotics research and application. – 2019. – Vol. 46. – P. 259-266. (0,438 п.л./ 0,219 п.л.). (Scopus)
7. Huang, L. Modeling and optimization of solidification cracking of 4043 aluminum alloys produced by cold metal transfer welding [Text] / L. Huang, X. Chen, S. Konovalov, M. Wang, C. Su, L. Han, Y. Wang // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2022. – Vol. 76. – P. 1123-1139. (1,063 п.л./ 0,152 п.л.). (Scopus)
8. Су, Ч. Влияние режима дуги на микроструктуру и микротвердость Al-5Mg сплава при проволоочно-дуговом аддитивном производстве [Текст] / Ч. Су, С. Чэн, Х. Хао // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. –

2023. – №. 4. – С. 39 - 45. (0,438 п.л./ 0,146 п.л.).

9. Су, Ч. Микроструктура и механические свойства проволоочно-дугового аддитивного производства сплава Al – 5Si [Текст] / Ч. Су, С. Чэн, Х. Хао // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2024. – №. 1. – С. 120 - 126. (0,438 п.л./ 0,146 п.л.).

Результаты интеллектуальной деятельности

1. Пат. 202110633084.2 Китай. Синергетический метод и устройство для лазерно-дугового композитного аддитивного производства с использованием металлической проволоки и порошка металла [Текст] / Ч. Су, Я. Ван, Ц. Ли, С. Чэнь, С.В. Коновалов; заявитель и патентообладатель Wenzhou Jinghe Zhizao Technology Co., Ltd. - № 202110633084.2; заявл. 07.06.21; опубл. 17.01.23, Бюл. – 16 с. (1 п.л./ 0,2 п.л.).

2. Пат. 202111387087.9 Китай. Устройство и способ аддитивного производства регулируемых компонентов с несколькими источниками тепла [Текст] / С. Чэнь, Ч. Су; заявитель и патентообладатель Университет Вэньчжоу. - № 202111387087.9; заявл. 22.11.21, опубл. 25.02.22, Бюл. – 17 с. (1,063 п.л./ 0,531 п.л.).

3. Пат. 202110062773.2 Китай. Способ изготовления дуплексно-мартенситной нержавеющей стали тросовой сварочной проволокой СМТ дугового аддитивного производства [Текст] / С. Чэнь, Ч. Су, Ц. Чжан; заявитель и патентообладатель Университет Вэньчжоу. - № 202110062773.2; заявл. 18.01.21, опубл. 04.06.21, Бюл. – 8 с. (0,5 п.л./ 0,167 п.л.).

4. Пат. 201710251322.7 Китай. Аппарат ультразвуковой аргодуговой сварки [Текст] / С. Чэнь, Ч. Су; заявитель и патентообладатель Университет Вэньчжоу. - № 201710251322.7; заявл. 18.04.17; опубл. 07.04.20, Бюл. – 10 с. (0,625 п.л./ 0,313 п.л.).

В прочих изданиях

1. Су, Ч. The effect of deposition height on the composition, microstructure, and microstructure of wire arc additive manufactured Al-5Si alloys [Текст] / Ч. Су, С.В. Коновалов, Л. Хуан // «Металлургия: технологии, инновации, качество»: сб. трудов XXIII Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк, 2022. – С. 18-21. (0,25 п.л./ 0,083 п.л.).

2. Су, Ч. The macroscopic morphology of wire arc additive manufactured Al-5Mg alloys [Текст] / Ч. Су, С.В. Коновалов, Л. Хуан // «Технические науки: проблемы и решения»: сб. статей LXVII Международной научно-практической конференции. – Москва, 2022. – С. 79-83. (0,313 п.л./ 0,104 п.л.).

3. Су, Ч. Comparing the mechanical properties of wire arc additive manufactured Al-5Mg alloys in different arc modes [Текст] / Ч. Су, С.В. Коновалов // «Advances in Science and Technology»: сб. статей XLIX Международной научно-практической конференции. – Москва, 2022. – С. 167-169. (0,188 п.л./ 0,094 п.л.).

4. Су, Ч. The distribution of micro-hardness WAAM Al-5Mg alloys in various arc modes [Текст] / Ч. Су, С.В. Коновалов, Л. Хуан // «Молодые исследователи за устойчивое развитие»: сб. статей III Международной научно-практической конференции. – Петрозаводск, 2022. – С. 43-46. (0,25 п.л./ 0,083 п.л.).

5. Су, Ч. The macroscopic morphology of wire arc additive manufactured Al-5Si alloys using different deposition strategies [Текст] / Ч. Су, С.В. Коновалов, Л. Хуан // «Всероссийские научные чтения»: сб. статей Всероссийской научно-практической конференции. – Петрозаводск, 2022. – С. 40-43. (0,25 п.л./ 0,083 п.л.).

6. Су, Ч. Исследование функционального сплава 4CR13-2CR18 полученного методом холодного переноса металлов [Текст] / Ч. Су, С.В. Коновалов, С. Чэнь // «Проблемы прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий»: сб. трудов XXII Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк, СибГИУ, 2021. – С. 113–114. (0,125 п.л./ 0,042 п.л.).

7. Су, Ч. The composition and microstructure of wire arc additive manufactured Al-5Mg alloys using variable arc mode [Текст] / Ч. Су, С.В. Коновалов, Л. Хуан // «Современные материалы техника и технология»: сб. статей XII Международной научно-технической конференции. – Курск, 2022. – С. 12–15. (0,25 п.л./ 0,083 п.л.).

8. Су, Ч. The mechanical properties of WAAM-CMT Al-5Si Alloy [Текст] / Ч. Су, С.В. Коновалов // «Материалы во внешних полях»: сб. трудов XII Международный онлайн симпозиума. – Новокузнецк, 2023. – С. 113. (0,0625 п.л./ 0,0313 п.л.).

9. Су, Ч. Влияние скорости подачи проволоки на макроскопическую морфологию сплавов Al-5Mg [Текст] / Ч. Су, Х. Хао, С.В. Коновалов // «Наука. Образование. Технологии: тенденции современного развития»: сб. статей II Международной научно-практической конференции. – Петрозаводск, 2024. – С. 201-205. (0,313 п.л./ 0,104 п.л.).