

На правах рукописи



ДУНАЕВ Дмитрий Александрович

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЗАГОТОВОК ИЗ
СТАЛЕЙ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ
НАПЛАВКИ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2025

Работа выполнена на кафедре «Литейные и высокоэффективные технологии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель:

Жаткин Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Тарасов Сергей Юльевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФПМ СО РАН), профессор отделения машиностроения (ИШНПТ)

Загуляев Дмитрий Валерьевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», профессор кафедры «Естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита диссертации состоится 24 декабря 2025 г. в 13.00 часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. Академика С.П. Королева» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» и на сайте <https://d99203902.samgtu.ru/spisok-dissertatsii>.

Отзывы на реферат просим выслать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, учёному секретарю диссертационного совета 99.2.039.02

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



А.Р. Луц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В связи с усложнением конструкции и повышением требований к структуре и свойствам деталей ответственного назначения из сплавов различных систем в настоящее время проводятся интенсивные исследования, направленные на внедрение в производство новых способов их получения.

Из ряда аддитивных технологий, основанных на использовании металломатричных материалов, выделяется объёмная (трехмерная) электродуговая наплавка (ЭДН), сочетающая высокую производительность и сравнительно низкую себестоимость процессов получения крупногабаритных заготовок, заготовок сложной конфигурации, а также при восстановительных и ремонтных работах.

Однако объёмная ЭДН, как и все аддитивные технологии, основанные на металломатричных материалах, характеризуется рядом недостатков: неоднородность по химическому составу, макро- и микроструктуры; специфические дефекты (несплавление слоев, поры различной природы), высокая шероховатость и невысокая геометрическая точность заготовок.

Поэтому, все большую **актуальность** приобретают разработки, так называемых, *гибридных технологий*, сочетающих аддитивное производство с одним или несколькими дополнительными процессами, которые оказывают синергический эффект на качество заготовок и деталей, функциональность и/или производительность процесса в целом. Такой подход в полной мере соответствует приоритетным направлениям стратегии научно-технологического развития Российской Федерации до 2035 года и стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГАУ «Центр инновационного развития и кластерных инициатив» по направлению «Реализация мероприятий по развитию инжинирингового центра аэрокосмического кластера Самарской области» (проект «Разработка автоматизированного комплекса и технико-технологических решений для сварки и наплавки в целях развития ремонта и сервиса», 2019 г.), Минобрнауки РФ в рамках проектной части государственного задания № 0778-2020-0005 (проект «Исследование механизмов формирования трехмерных объектов в системе «твердое-жидкое-твердое» в процессах прямого подвода энергии и материала», 2020-2022 г.г.), Российского научного фонда (проект «Исследование процессов формирования структуры и свойств материалов, полученных электродуговой наплавкой для производства деталей из алюминиевых сплавов в аэрокосмической промышленности», 2023-2024 г.г.).

Основная часть исследований, экспериментов и испытаний выполнена на базе «Центра литейных технологий» (ЦЛТ), Центра коллективного пользования «Исследование физико-химических свойств веществ и материалов» ФГБОУ ВО СамГТУ и НИЛ-41 «Прогрессивные технологические процессы пластического деформирования» ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. Академика С.П. Королева».

Цель диссертационной работы: установление особенностей формирования структуры и свойств заготовок из сплавов на основе Fe и Al, получаемых способом объёмной электродуговой наплавки за счет гибридизации с магнитно-импульсной обработкой наплавляемых слоев, а также электродуговым воздействием неплавящимся электродом на поверхность выращенных заготовок.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

1. Исследовать влияние параметров ЭДН на геометрию, структуру и свойства заготовок из сталей 09Г2С и 06Х19Н9Т.
2. Исследовать влияние режимов и параметров ЭДН на структуру и физико-механические свойства заготовок из сплавов СвАМг5 и СвАК5.
3. Оценить эффективность магнитно-импульсной обработки (МИО) на структуру и свойства наплавляемых слоев из сплава СвАК5.
4. Оценить эффективность электродугового поверхностного модифицирования (ЭДПМ) неплавящимся электродом на структуру и свойства заготовок из сплава СвАК5.
5. Выполнить опытно-промышленную апробацию разработанных технико-технологических подходов.

Объектом исследования являются процессы объемной электродуговой наплавки.

Предметом исследования являются заготовки из сплавов на основе Fe и Al.

Научная новизна:

1. Установлено, что жидкотекучесть и объемная усадка сталей марок 09Г2С и 06Х19Н9Т влияют на геометрическую точность заготовок по отношению к электронно-геометрической модели: увеличение размеров при использовании стали 09Г2С с повышенной жидкотекучестью; уменьшение размеров при использовании стали 06Х19Н9Т с повышенной объемной усадкой.
2. Установлено, что укрупнение дендритов и увеличение пористости в заготовках из сплавов СвАМг5 и СвАК5 происходит в последовательности **импульсный режим Cold Arc (ИР-СА)→импульсный режим (ИР)→непрерывный режим (НР)**, что связано с увеличением тепловложения вызывающим увеличение перегрева, объема и времени существования жидкой фазы, а также снижение скорости охлаждения при затвердевании.
3. Установлено влияние размера зерна на коэффициент термического линейного расширения алюминиевого сплава СвАК5 при нагреве выращенных заготовок в интервале температур 20÷400 °С.
4. Впервые установлено, что жидкофазная МИО наплавляемых слоев способствует измельчению структуры и росту механических свойств сплава СвАК5.
5. Впервые исследовано влияние твердофазного ЭДПМ на структуру и свойства сплава СвАК5. Установлено, что ЭДПМ измельчает структурные составляющие сплава на глубину до 7 мм.

Теоретическая значимость. Полученные в диссертационной работе научные результаты обладают теоретической значимостью и способствуют углублению современных знаний об особенностях структурообразования сплавов на основе Fe и Al при объемной электродуговой наплавке. Гибридные воздействия в виде МИО жидкой фазы и твердофазное ЭДПМ являются дополнительным инструментом для улучшения структуры заготовок из алюминиевых сплавов, полученных объемной ЭДН.

Практическая значимость

1. Установлены оптимальные параметры электродуговой наплавки (сила тока 90 А, скорость печати 620 мм/мин) в импульсном режиме Cold Arc, обеспечивающие получение заготовок из алюминиевого сплава СвАК5 с однородной структурой и минимальным количеством дефектов.
2. Показана принципиальная возможность создания гибридной технологии «электродуговая наплавка - МИО», для реализации которой разработан и изготовлен индуктор, совмещенный со сварочной горелкой. Конструкция индуктора защищена патентом на полезную модель.

3. Показана принципиальная возможность создания гибридной технологии «электродуговая наплавка-ЭДПМ», позволяющая осуществлять поверхностное модифицирование литых и наплавленных заготовок из алюминиевых сплавов.

4. Разработанные технико-технологические решения прошли успешную опытную апробацию при восстановлении рабочей части просечных пуансонов из стали марки 9ХС для пробивки пазов в бандажном кольце лопаток турбины ГТД (ПАО «ОДК-Кузнецов»); при изготовлении полноразмерной заготовки детали «Кронштейн» из сплава СвАК5. Предложена принципиальная конструкция устройства для принудительного охлаждения заготовок в процессе ЭДН.

Методы исследования и достоверность научных результатов.

Применялись современные методы оптической металлографии, структурно-фазового анализа, проведения механических испытаний с применением современного аттестованного оборудования ЦЗЛ предприятий, научных лабораторий ФГБОУ ВО «СамГТУ» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. Академика С.П. Королева».

Достоверность полученных результатов в работе подтверждается использованием известных положений фундаментальных наук, хорошей согласованностью полученных теоретических результатов с результатами экспериментальных данных, а также с результатами исследований других авторов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Особенности влияния режимов и параметров электродуговой наплавки на структуру и механические свойства заготовок из сплава СвАК5.
2. Результаты исследований по влиянию условий теплоотвода в процессе наплавки на коэффициент термического линейного расширения заготовок из сплава СвАК5 в интервале температур $20 \div 400$ °С.
3. Влияние параметров жидкофазной обработки на структуру и механические свойства заготовок из сплава СвАК5, полученных по «ЭДН-МИО».
4. Влияние параметров твердофазной обработки поверхности заготовок из сплава СвАК5, полученных по гибридной технологии «ЭДН-ЭДПМ».

Личный вклад автора заключается в непосредственном проведении экспериментов, исследований и обработке полученных результатов; разработке управляющих программ для выращивания заготовок. Постановка цели и задач, формулировка научных положений и выводов были осуществлены совместно с научным руководителем в процессе подготовки научных статей и текста диссертации.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 20 научных работах, в том числе: 4 статьи в журналах из перечня ВАК РФ по научной специальности 2.6.17-Материаловедение, из них 3 статьи в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science в изданиях Q3, 1 патент на полезную модель.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция «Технологии специального приборостроения. Молодёжь в науке — 2019» (г. Заречный, 2019); Международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии, оборудование и материалы заготовительных производств в машиностроении» (г. Москва, 2022 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Перспективные материалы и технологии в авиадвигателестроении» (г. Самара, 2023); XII Международная научно-практическая конференция «Прогрессивные литейные технологии» (г. Москва, 2024).

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационное исследование по своим целям, задачам, методам исследования, содержанию и научной

новизне соответствует следующим пунктам направлений исследований из паспорта специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки): **пункт 1:** в части «Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры металлических, неметаллических материалов и композитов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности деталей, изделий, машин и конструкций»; **пункт 2:** «Установление закономерностей физико-химических и физико-механических процессов, происходящих в гетерогенных и композиционных структурах»; **пункт 3:** «Разработка научных основ выбора металлических, неметаллических и композиционных материалов с заданными свойствами, применительно к конкретным условиям изготовления и эксплуатации деталей, изделий, машин и конструкций».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из 5 глав, заключения, основных выводов, списка литературы из 138 наименований и 2 приложений. Изложена на 164 страницах, содержит 64 рисунка, 21 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны новизна и практическая значимость работы, изложены методология и методика исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту, подтверждена достоверность результатов работы, указан личный вклад автора в исследование.

В первой главе на основании анализа современной научной литературы установлено, что в России исследованиями в области объемной электродуговой наплавки (ЭДН) интенсивно занимаются научные коллективы ЦНТИ «Новые производственные технологии» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Панченко О.В., Жабров Л.А. и др.), Пермского национального исследовательского политехнического университета (Щицын Ю.Д. и др.), Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск (Тарасов С.Ю. и др.), Томского политехнического университета, Сибирского государственного индустриального университета (Коновалов С.В. и др.), МИСИС (Белов Н.А. и др.) и т.д. Подробно рассмотрены преимущества и недостатки объемной ЭДН по сравнению с другими методами наплавки. Особое внимание уделено применению ЭДН для алюминиевых сплавов, а также проблемам, возникающим при наплавке: неоднородность химического состава, структуры и свойств по высоте наплавки, пористость, несплавления слоев и т.д. Выявлена эффективность гибридизации ЭДН с другими процессами.

Во второй главе описаны материалы и методы исследования. В качестве присадочных материалов использовали проволоки из стали марок 09Г2С и 06Х19Н9Т, алюминиевых сплавов СВАМг5 и СВАК5. Наплавку осуществляли сварочным инверторным полуавтоматом EWM Titan 350 XQ puls D в среде аргона с помощью 6-ти осевых роботов-манипуляторов Kuka KR 2000-2 и Dobot CR10, 3-х осевом 3D-принтере WANHAO DUPLICATOR 9. Управляющие программы разрабатывались с применением пакета трехмерного моделирования КОМПАС-3D, программ *Simplify-3D*, *Mach3Loader* (профиль Reabin Mill), Sprut CAM robot 16. Магнитно-импульсную обработку наплавляемых слоев производили на установке МИУ-1 (СГУ им. С.П. Королева). Поверхностное модифицирование наплавленных заготовок производили с помощью источника питания «Сварог TIG 200 Р АС/DC». Исследования микроструктуры и микроанализ зон наплавки проводились на аналитическом растровом электронном микроскопе JSM-6390А фирмы JEOL, а механические испытания на растяжение - на разрывной испытательной машине ИР 5057-50;

микротвердость – на микротвердомере ПМТ-3. Металлографический анализ выполняли с применением ПАК SIAMS 800.

В третьей главе приведены результаты исследований объёмной ЭДН сталей 09Г2С, 06Х19Н9Т и алюминиевых сплавов СвАМг5, СвАК5.

Из стальных присадочных проволок марок 09Г2С и 06Х19Н9Т выращивали заготовки, варьируя скоростью движения горелки относительно стола $v_{\text{дв}}$; скоростью подачи присадочной проволоки $v_{\text{под}}$; напряжением дуги U (число слоев во всех экспериментах равнялось 7). При наплавке заготовок из стали 09Г2С фактические отклонения по длине и ширине, в основном, имели знак «+» по отношению к размерам электронногеометрической модели (ЭГМ), размерами 20x20x20 мм, в связи с повышенной жидкотекучестью, обусловленной повышенными концентрациями С, Мп, Si. Наименьшие отклонения от ЭГМ (<5%) были получены при $v_{\text{под}} = 3,5$ м/мин; $v_{\text{дв}} = 0,45$ м/мин; $U = 18$ В. Заготовки из стали 06Х19Н9Т по всем фактическим размерам имели отклонения в меньшую сторону по сравнению с ЭГМ, что связано с повышенными значениями объёмной усадки, обусловленной высоким содержанием Ni (8,0-10,0%) в качестве легирующего элемента. Наименьшие отклонения от размеров ЭГМ (<3%) были получены при $v_{\text{под}} = 4,0$ м/мин; $v_{\text{дв}} = 0,60$ м/мин; $U = 20$ В. Микроструктура заготовок характеризовалась однородностью с незначительным количеством пор по высоте наплавки. Микроструктура наплавки из 09Г2С состоит из бейнита, феррита и перлита. В микроструктуре стали 06Х19Н9Т наблюдаются хорошо выраженные аустенитные зерна. В нижней части зоны наплавки формируется выраженная дендритная структура (аустенит и α -фаза), обусловленная более высоким теплоотводом через подложку. Механические испытания на растяжение при комнатной температуре показали, что заготовки обладают приемлемым комплексом механических свойств, превышающих справочные значения (таблица 1). Это подтверждает, что процесс формирования по оптимальному режиму ($v_{\text{под}} = 4,0$ м/мин; $v_{\text{дв}} = 0,3$ м/мин; $U = 20$ В) идет стабильно, без образования критических зон несплавления и пористости.

Таблица 1 - Результаты испытаний на растяжение после наплавки*

Марка стали	σ_b , МПа		σ_t , МПа		δ , %	
	эксп.	справ.	эксп.	справ.	эксп.	справ.
09Г2С	536,7	510-520	423,3	400-420	23,0	He < 22,0
06Х19Н9Т	683,3	He < 640	493,3	He < 430	41,0	He < 35,0

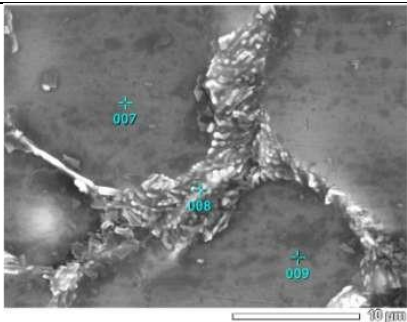
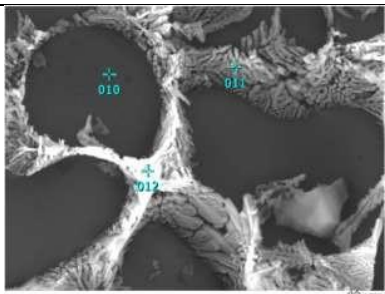
*Справочные данные согласно ТУ на сварочные проволоки указанных марок

При наплавке заготовок из сплава СвАМг5 в среде аргона варьировали режимами (импульсный; непрерывный) и параметрами (сила тока I ; U ; $v_{\text{под}}$) наплавки. Наплавку проводили послойно по прямолинейной траектории, число слоев наплавки в каждом эксперименте - 10 шт. Наплавку каждого слоя проводили дискретно с интервалом по времени 2 мин. Установлено, что структура сплава представляет собой твердый раствор магния на основе алюминия с включениями дисперсных частиц β -фазы (Mg_2Al_3). Содержание Mg варьировалось в диапазоне 4,8÷5,1%, что соответствует химическому составу сплава СвАМг5. Увеличение силы тока снижает скорость охлаждения, что приводит к укрупнению частиц β -фазы, особенно в средних зонах, за счет снижения теплоотвода через подложку в процессе наплавки.

Наплавку заготовок из сплава СвАК5 осуществляли в среде аргона послойно, варьируя режимы (импульсный, импульсный-Cold Arc, непрерывный) и параметры (I -

47÷110 А; $v_{\text{под}}=3,8\div7,1$ м/мин) наплавки. Количество слоев – 6÷16. Среднее содержание кремния в образцах, наплавленных по трем режимам, находится в интервале 5,46÷5,91%, что соответствует химическому составу сплава СВАК5. На основании локального микрорентгеноспектрального анализа содержание Si в твердом растворе на основе Al (таблица 2) существенно выше относительно равновесной диаграммы состояния системы Al-Si (0,067 масс. %). Установленный факт свидетельствует о том, что затвердевание протекало при высоких скоростях охлаждения в неравновесных условиях. При анализе структуры на границе «подложка-наплавленный слой» установлено проникновение материала наплавки в подложку (рисунок 1). Анализ микроструктуры зон наплавки показал, что по высоте формируется двухфазная структура доэвтектического сплава системы Al-Si, состоящая из дендритов α -Al и эвтектики в междендритном пространстве. С увеличением I и высоты наплавки тепло аккумулируется в предыдущих слоях и подложке, что обуславливает укрупнение структурных составляющих. С увеличением тока сварочной дуги в первом слое на границе контакта «наплавка-подложка» пористость снижается за счет увеличенного теплоотвода через подложку (рисунок 1).

Таблица 2 – Влияние режима наплавки на концентрацию Si в α -Al

Режим наплавки	Изображение	№ точки	Содержание компонентов, масс. %	
			Al	Si
Импульсный (67А)		007	99,48	0,52
		008	87,34	12,66
		009	99,42	0,58
Импульсный Cold Arc (67А)		010	98,95	1,05
		011	83,68	16,32
		012	63,93	36,07

Установлено влияние режимов наплавки и силы тока на средние размеры дендритов α -Al и пористость заготовок (рисунок 2). Укрупнение дендритов и увеличение пористости происходит в последовательности **импульсный режим Cold Arc (ИР-СА)→импульсный режим (ИР)→непрерывный режим (НР)**, что связано с увеличением тепловложения и, как следствие, увеличением объема, величины перегрева, времени существования жидкой фазы и скорости охлаждения при затвердевании.

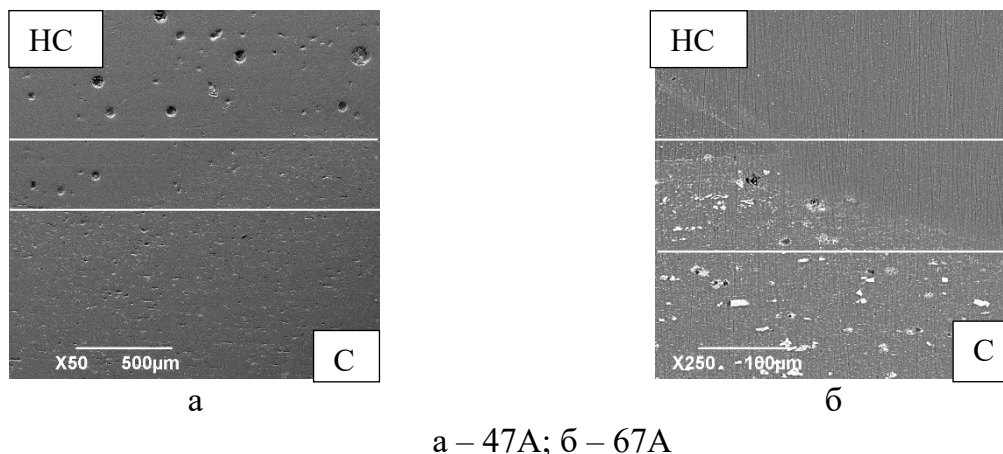


Рисунок 1 - Микроструктура наплавленных заготовок из сплава СвАК5 на границе «подложка (С) - наплавленный слой (НС)» в зависимости от тока сварочной дуги

Расчеты показали, что за время воздействия дуги период существования жидкой фазы при наплавке в режиме **ИР-СА** составляет 1 с, в режиме **ИР** – 1,3 с, а в **НР** – 5 с. Таким образом, более длительное время существования жидкой фазы при **НР**, по сравнению с **ИР-СА** обуславливает меньшие скорости охлаждения и формирование более крупнодисперстной структуры.

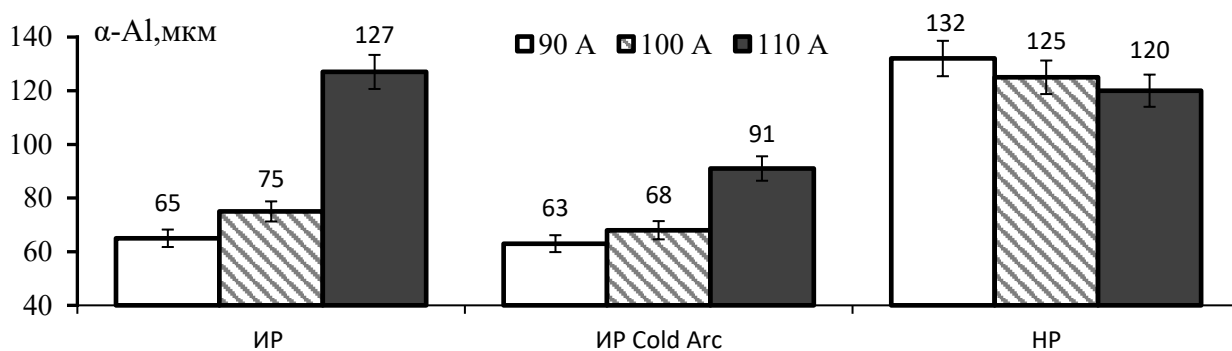
Полученные результаты согласуются с исследованиями И.В. Гаврилина, В.И.Никитина, К.В. Никитина в области литейных технологий, в которых показано, что увеличение времени жизни жидкой фазы способствует росту пористости и укрупнению структуры в литейных сплавах различных систем.

Высокие значения микротвердости (310÷340 МПа) установлены при наплавке заготовок в **ИР**, а самые низкие (245÷265 МПа) в **НР** при силе тока 100÷110 А.

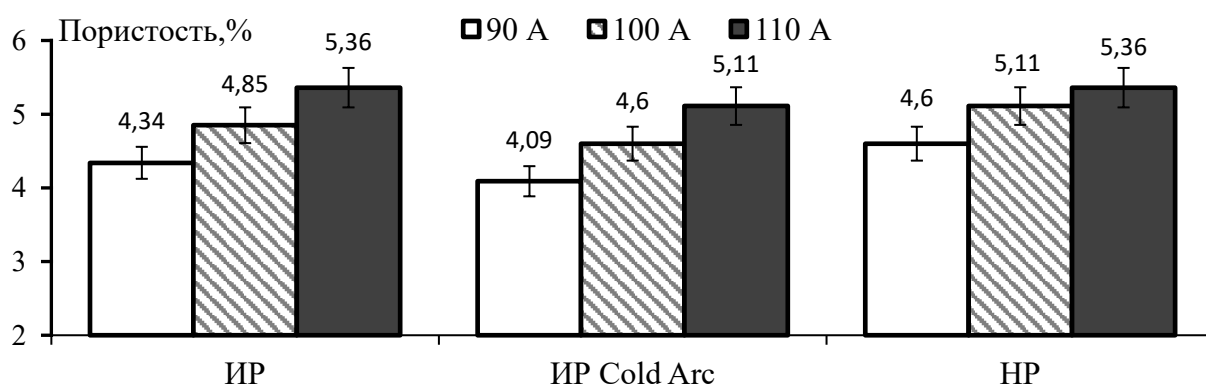
При исследовании механических свойств при растяжении выявлены следующие закономерности: при наплавке в **ИР** и **ИР-СА** с ростом силы тока σ_b снижается из-за укрупнения дендритов α -Al и пористости. При наплавке в **НР** с ростом силы тока σ_b снижается, в первую очередь, из-за увеличения пористости. В связи с этим сделано заключение о том, что существенное влияние на предел прочности оказывают поры, формирующиеся в наплавленных слоях.

Для определения коэффициента термического линейного расширения (КТЛР) образцы вырезались из заготовок вдоль и перпендикулярно направлению наплавки (рисунок 3). Заготовки получали в **ИР-СА** при $I \sim 90$ А, $U \sim 19$ В, $v_{\text{под}} \sim 6,2$ м/мин, и $v_{\text{дв}} \sim 600$ мм/мин, расход аргона ~ 15 л/мин. Дополнительно определяли КТЛР литой заготовки, полученного переплавом проволоки СвАК5 и заливкой в холодный кокиль. Установлено возрастание КТЛР в интервале 20÷400 °С до $(22 \div 23) \times 10^{-6}$ град⁻¹ с наибольшим темпом нарастания на участке (20÷120) °С.

Сравнительный анализ выявил различия КТЛР в зависимости от ориентации вырезки образцов. У образцов, вырезанных вдоль направления наплавки, темпы роста КТЛР на участке (20÷120) °С зависят от места вырезки относительно подложки. Для образца 1 рост КТЛР проходит значительно медленнее, чем для образца 2 – в первом случае его значения не превышают $(15 \div 16) \times 10^{-6}$ град⁻¹ вплоть до 120 °С, а для второго образца превысили эти значения уже при (60÷70) °С. Анализ микроструктуры показал, что ускоренный теплоотвод в подложку при наплавке нижних слоев формирует более дисперсную структуру в образце 1, чем во 2-м. Более медленный рост КТЛР для образцов с мелкодисперсной структурой обусловлен большей площадью границ зерен, тормозящих их расширение при нагреве. Лишь при более высоких температурах наблюдается выравнивание значений КТЛР данных образцов.



а



б

а - средние размеры дендритов α -Al; б - пористость

Рисунок 2 - Влияние режима и силы тока при наплавке на структуру и пористость заготовок из сплава СвАК5

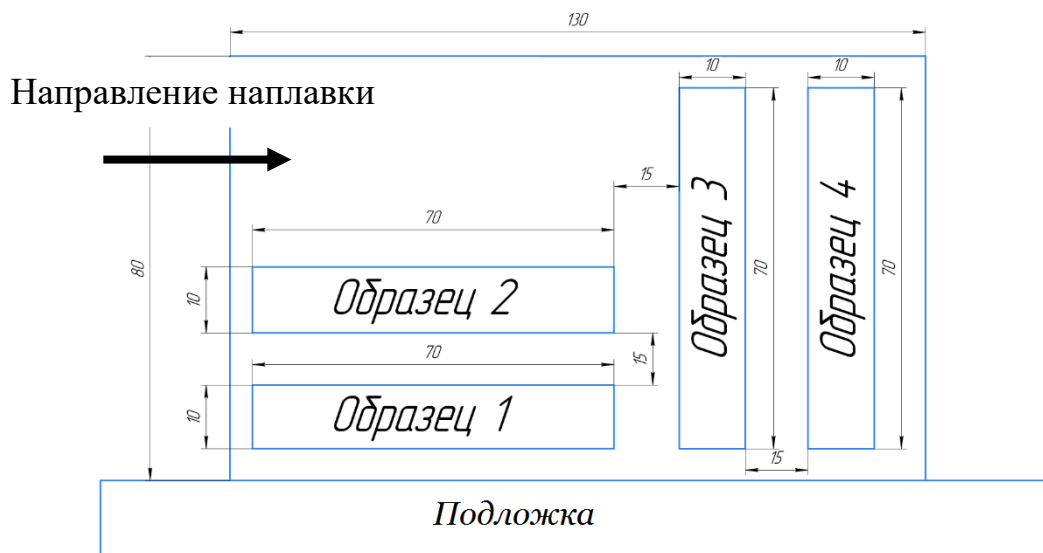


Рисунок 3- Схема вырезки образцов для определения КТЛР

КТЛР образцов, вырезанных перпендикулярно направлению наплавки (3, 4), наиболее сильно возрастает при температурах в диапазоне $180 \div 400$ °С до $(20-22) \times 10^{-6}$ град⁻¹, приближаясь к КТЛР литого образца в этом же диапазоне температур. Результаты исследования подтверждают наличие структурной неоднородности по высоте заготовки, а также влияние структурного фактора на характер изменения КТЛР,

установленного в работах А.А. Паркина, С.С. Жаткина, К.В. Никитина для сплавов системы Al-Si.

В четвертой главе оценивали эффективность жидкофазной МИО на структуру и свойства наплавляемых слоев и твердофазного ЭДПМ на структуру и свойства заготовок из сплава СВАК5.

Исследовали влияние МИО на сварочный шов из сплава СВАК5 при сварке пластин из деформируемого сплава АД1. В процессе МИО индуктор и сварочная горелка были совмещены последовательно, причем воздействие оказывалось на зону наплавки, находящуюся в кристаллизующемся состоянии. Наплавка проводилась в импульсном режиме по следующим параметрам: $I = 190$ А; $v_{\text{под}} = 5,2$ м/мин; $v_{\text{дв}} = 0,65$ м/мин; $U = 21,7$ В. Энергия импульса МИО менялась в диапазоне 250÷500 Дж, а частота следования импульсов 1 Гц.

Установлено измельчение структурных составляющих в зоне сварного шва, повышается твердость и предел прочности при растяжении. Это связано с синергическим воздействием, вызванным высоким градиентом температур в процессе воздействия электрической дуги и импульсного магнитного поля (ИМП) на кристаллизующуюся зону наплавки. Выполнили ряд экспериментов по изучению влияния МИО на структуру и свойства заготовок, получаемых ЭДН по разработанной схеме для реализации гибридной технологии «электродуговая наплавка - МИО» (рисунок 4). Разработаны конструкции и изготовлены одновитковые индукторы, сопряженные со сварочной горелкой. Моделирование напряженности импульсного магнитного поля (ИМП) при единичном импульсе с $W \sim 186$ Дж показало, что максимальное напряжение ~ 2000 мВ на датчике ИМП достигается в зоне подачи присадочного материала при использовании индуктора в виде открытого тора (рисунок 5, а). При использовании прямоугольного индуктора максимальное напряжение на датчике ИМП достигает 750 мВ (рисунок 5, б) с формированием двух энергетических пиков. На основании результатов тестовых наплавов в дальнейшем использовали индуктор в виде открытого тора (рисунок 5, а) по режимам ЭДН и МИО, представленным в таблице 3.

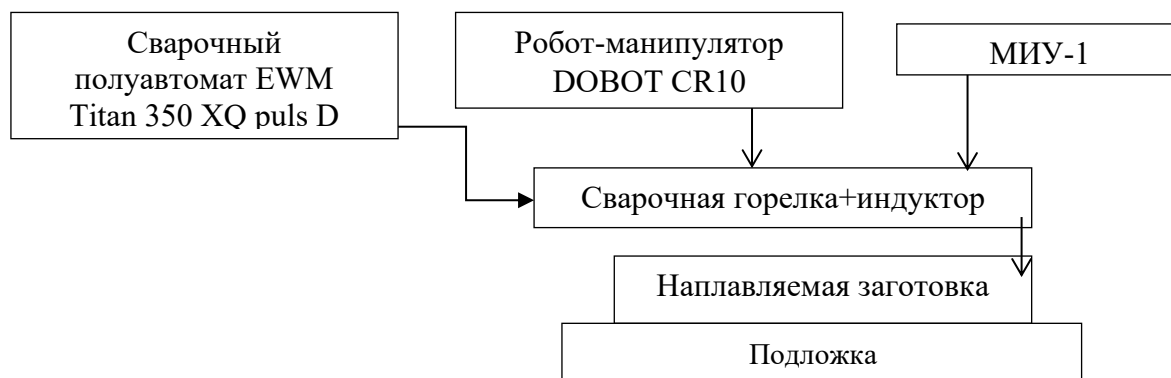
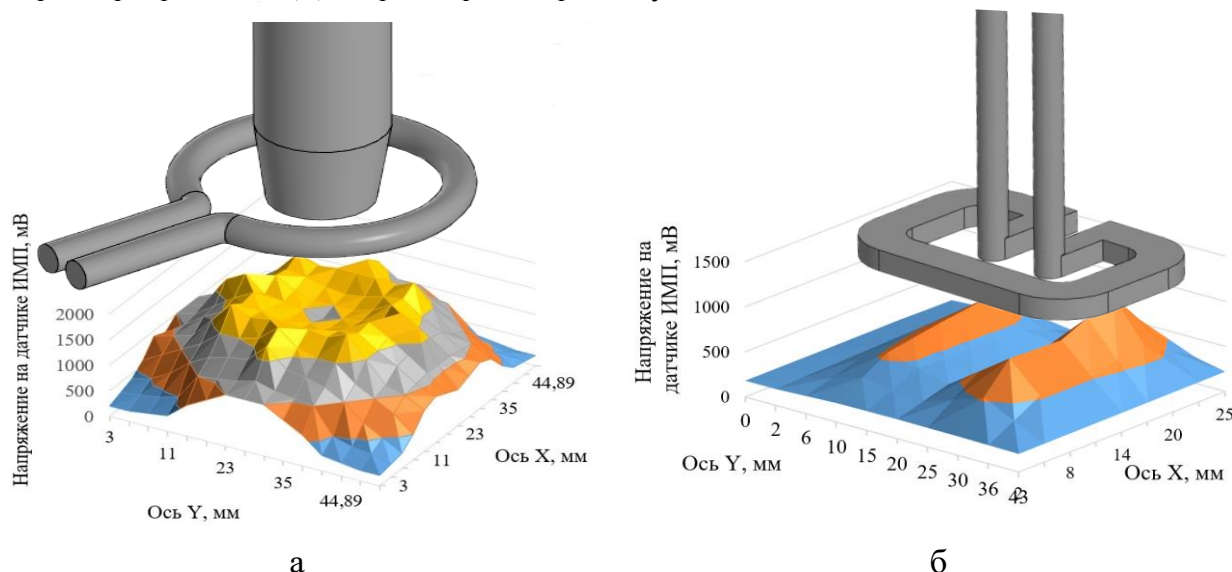


Рисунок 4 - Принципиальная схема гибридной технологии «электродуговая наплавка - МИО»

Изменение микроструктуры и свойств в зависимости от энергии импульса представлено на рисунке 6 и в таблице 4.

Результаты испытаний показали устойчивое модифицирующее влияние МИО на дендриты α -Al - в среднем их размер уменьшился на 37% по сравнению с заготовками,

наплавленными без воздействия. Максимальное измельчение было установлено при энергии разряда 186 Дж – размер дендритов уменьшился на 69%.



а – индуктор в виде открытого тора; б – прямоугольный индуктор
Рисунок 5 - Результаты моделирования напряженности ЭМП в зависимости от вида индуктора

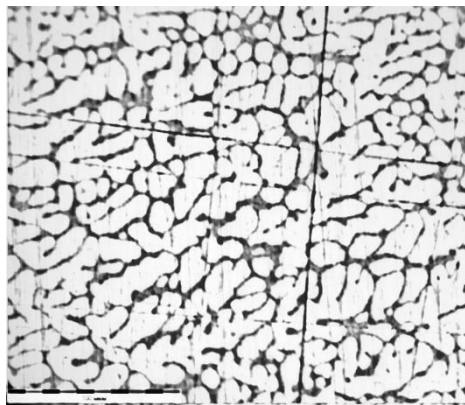
Таблица 3 - Параметры ЭДН и МИО тестовых заготовок из сплава СвАК5

Режимы ЭДН*				
Защитный газ	Расход газа, л/мин	Сила тока, А	Скорость печати, мм/мин	Режим
Ar	15	100	450	ИР-АС
Режимы МИО				
W, Дж		Частота следования импульсов, Гц		
-		-		
186		1		
332				
518				

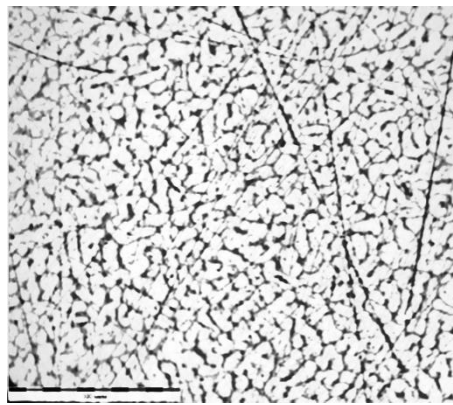
*Диаметр присадочной проволоки – 1 мм; скорость подачи – 7 м/мин; длина наплавленных образцов – 100 мм; количество слоев -6 шт.; высота наплавки – 10 мм

Микротвердость и относительное удлинение монотонно возрастают и достигают максимума при энергии разряда 518 Дж: $H_{\text{ср}}$ возросла на 30%, а δ – на 22%.

Выявлен немонотонный характер изменения пористости: при энергии МИО 186 Дж данный показатель снижается на 11% по сравнению с наплавкой без МИО, с увеличением энергии разряда пористость снова растет, и при W 332-518 Дж достигает значений, сопоставимыми с наплавкой без МИО. Аналогично изменяется и предел прочности при растяжении: максимальное значение установлено при воздействии с W 186 Дж – 367,0 МПа, что на 19% выше необработанного состояния. С увеличением W происходит снижение σ_b до значений, сопоставимым с наплавкой без МИО.



a



б

Рисунок 6 - Микроструктура заготовок из сплава СВАК5, полученных по технологии «электродуговая наплавка - МИО»: *a* – без МИО; *б* – W=186 Дж

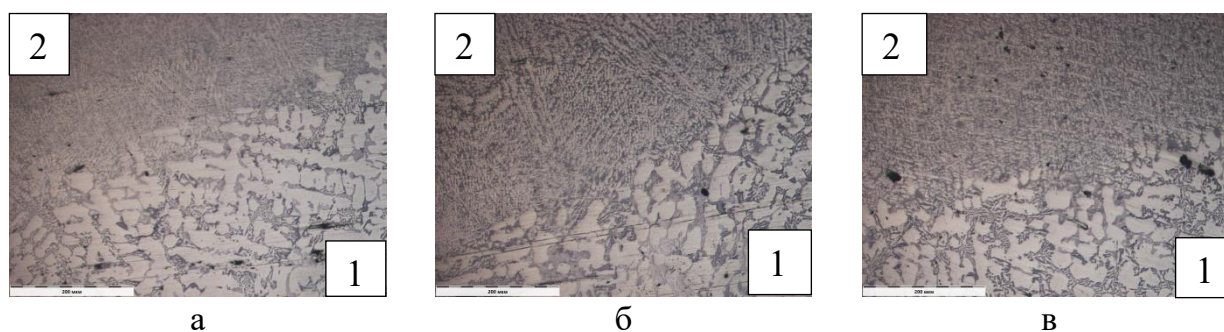
Таблица 4 – Влияние МИО на структуру и механические свойства заготовок из сплава СВАК5

W, Дж	Размер α -Al, мкм	Пористость, %	$H_{\text{ср}}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ ,%
Без МИО	71	4,1	290,0	172,0	20,0
186	42	3,7	367,0	205,0	22,4
332	64	4,2	372,0	196,2	23,0
518	49	4,3	377,0	177,3	24,3

Таким образом, как и в экспериментах по влиянию режимов наплавки, было выявлено доминирующее влияние пористости в наплавленных слоях на предел прочности при растяжении.

Устойчивое модифицирующее влияние МИО на структуру и свойства силуминов при жидкофазном воздействии магнитных импульсных полей было ранее установлено в работах В.А. Глушкова, Д.Г. Черникова, В.И. Никитина, К.В. Никитина. Результаты экспериментов с МИО при получении сплава СВАК5 объемной ЭДН согласуются с результатами указанных работ. Таким образом, экспериментально показана возможность создания эффективной гибридной технологии «электродуговая наплавка - МИО». На конструкцию индуктора, сопряженного со сварочной горелкой, получен *патент на полезную модель №235516* «Индуктор для магнитно-импульсной обработки при объемной электродуговой наплавке».

Тестовые эксперименты по электродуговому поверхностному модифицированию (ЭДПМ) заготовки из сплава АК7ч, полученной литьем в кокиль, показали существенное модифицирующее воздействие на морфологию дендритов α -Al (рисунок 7). Послойный анализ микроструктуры выявил, что с ростом силы тока увеличивается глубина модифицированного слоя: с 1,32 мм при 100А до 1,84 мм при 120А. Однако, при этом было отмечено и увеличение пористости.



а-в – 100, 110, 120 А, соответственно

Рисунок 7 - Влияние тока дуги на микроструктуру литого сплава АК7ч
(1 – литая структура; 2 – структура после поверхностного модифицирования)

Далее исследовали влияние полярности дуги на поверхностное модифицирование выращенных заготовок из сплава СвАК5. Изменения полярности дуги применяют в стандартных процессах сварки в зависимости от химического состава и толщины свариваемого материала для регулирования времени нахождения вольфрамового электрода в качестве катода и анода. Баланс полярности при сварке неплавящимся электродом на переменном токе — это соотношение времени, в течение которого ток находится в прямой (нагрев металла) и обратной (очистка поверхности) полярности. Режимы поверхностного модифицирования представлены в таблице 5.

Максимальное измельчение структурных составляющих произошло при ЭДПМ на балансе полярности 30% (рисунок 8).

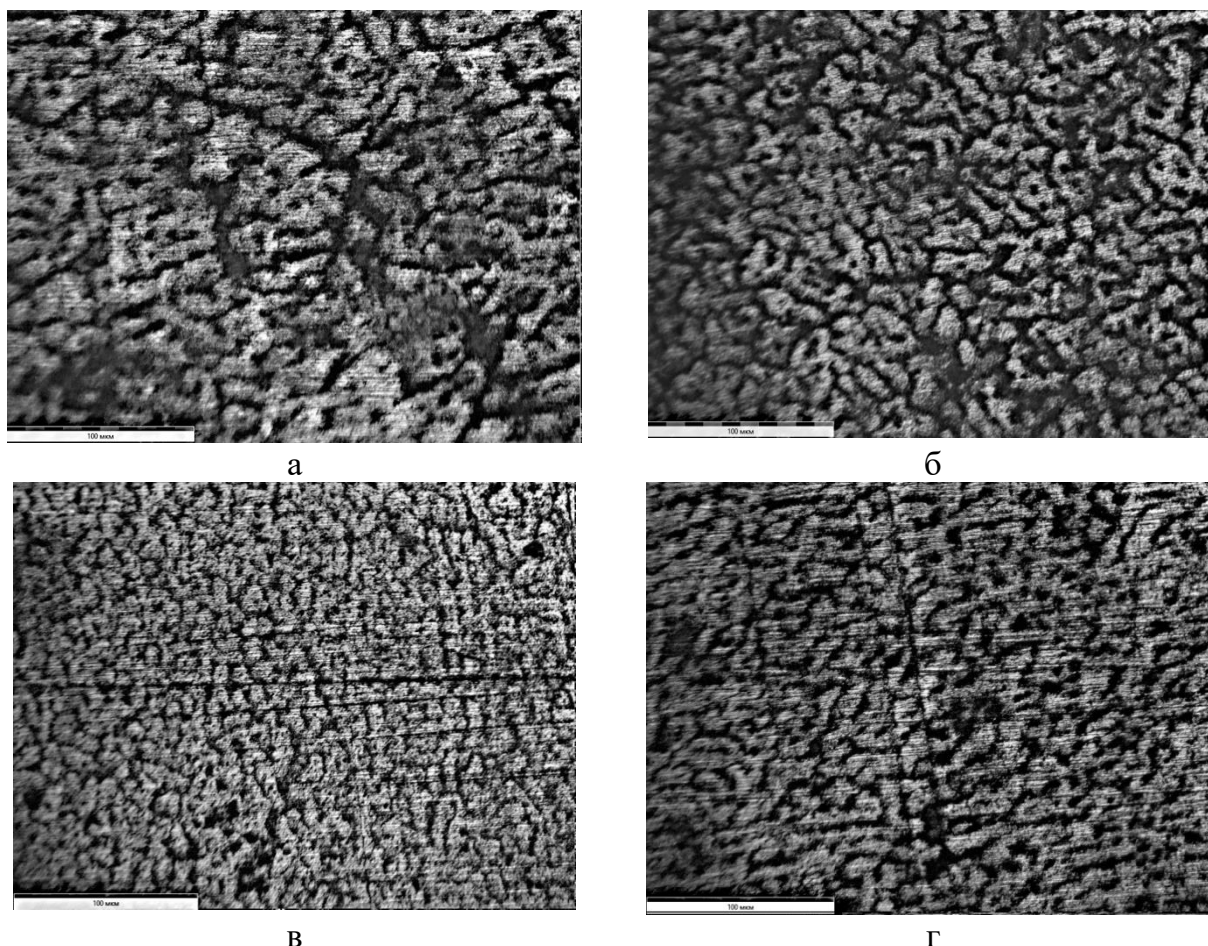
Для оценки глубины обработки измеряли микротвердость с шагом 1 мм. Максимальный эффект от ЭДПМ наблюдается на расстоянии 1-4 мм от поверхности заготовки: в этих слоях микротвердость, в среднем, выше на 39% (360-390 МПа) по сравнению с микротвердостью необработанной заготовки (270-290 МПа). С удалением от поверхности на глубину 5-6 мм микротвердость снижается до 310-300 МПа, и далее практически сравнивается со значениями заготовок без обработки.

Таблица 5 - Режимы поверхностного модифицирования заготовок из сплава СвАК5

№ п/п	Баланс полярности*, %	Ток дуги, А	Скорость движения робота, мм/мин	Расход газа, л/мин
1	30	80	600	20
2	50			
3	70			

Сделан обоснованный вывод о том, что эффективность ЭДПМ сохраняется на глубине 1-4 мм от поверхности обработанной заготовки. Установленный эффект при дополнительных исследованиях позволяет прогнозировать сокращение времени термической обработки выращенных заготовок, а также применение данного метода для селективного поверхностного модифицирования отливок, получаемых традиционными способами литья. Возможность сокращения времени выдержки при термообработке в зависимости от степени модифицированности структуры силуминов ранее была установлена в работах К.В. Никитина, Е.А. Амосова и др.

Таким образом, экспериментально показана возможность создания эффективной гибридной технологии «ЭДН – ЭДПМ».

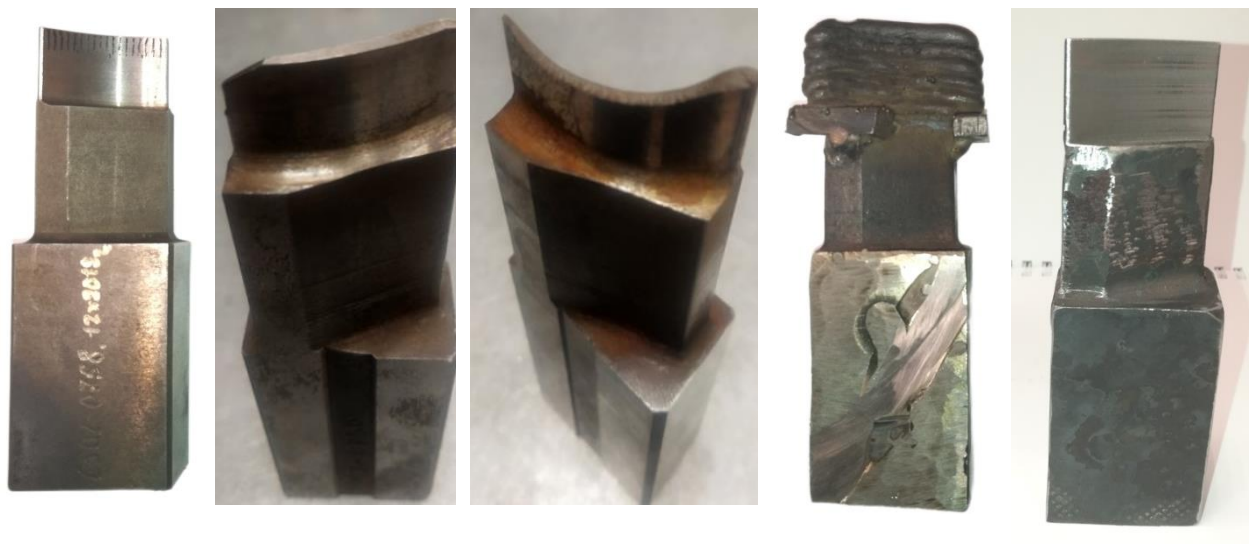


а – без обработки; б – баланс полярности 50%, в – баланс полярности 30%,
г – баланс полярности 70%

Рисунок 8 - Микроструктура сплава СВАК5 после ЭДПМ

В пятой главе представлены результаты апробации разработанных технологий.

Для ПАО «ОДК-Кузнецов» в рамках НИОКР выполнили восстановление просечных пуансонов из стали 9ХС (рисунок 9), применяемых для пробивки пазов в бандажном кольце для лопаток турбины ГТД. После отпуска проводилось полное удаление рабочей зоны поврежденного пуансона. Послойная роботизированная наплавка проводилась на подготовленные пуансоны штампов, а для исключения возможного стекания наплавленного незастывшего металла предварительно к краям наплавляемой рабочей зоны пуансона приваривались пластины из стали 9ХС. Наплавка штампов на работе производилась послойно на прямой полярности в среде аргона при $I=175$ А; скорости подачи проволоки 3 м/мин и скорости движения 300 мм/мин. Для исключения чрезмерного растекания и перегрева время выдержки между слоями составляло 3 мин. Внешний осмотр рабочей поверхности пуансонов после механической обработки не выявил наличие несплавов, пористости и других дефектов. Аналогичные результаты были получены и при металлографическом анализе.



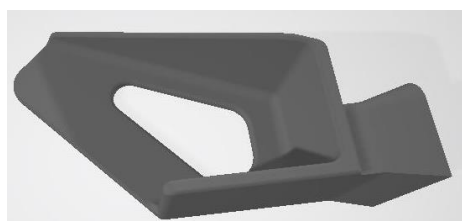
а б в г д

а – рабочий пуансон; б, в – пуансоны с дефектами «глубокий скел» и «ударно-абразивный износ», соответственно;
г – после восстановительной наплавки; д – после механической обработки
Рисунок 9 - Просечные пуансоны из стали 9XC:

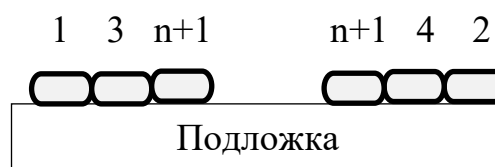
Партия восстановленных пуансонов в количестве 10 шт. была признана годной и допущена для дальнейшей эксплуатации.

Исследована возможность получения заготовок по технологии ЭДН. Наплавку заготовки «Кронштейн» (рисунок 10, а) из сплава СВАК5 выполняли в ИР-СА при $I=90A$, $v_{под} = 6,3$ м/мин, $v_{дв}=0,62$ м/мин; расход аргона 15 л/мин; толщина единичного слоя - 1,5 мм. Исходя из геометрии заготовки, была выбрана стратегия наплавки «от периферии к центру» (рисунок 10, б), которая обеспечивала минимальный перегрева соприкасающихся слоев с одновременной их ролью в качестве поддерживающих структур. Общее время наплавки составило 70 мин. Проведенный эксперимент показал возможность применения ЭДН для получения фасонных заготовок (рисунок 10, в).

Разработана принципиальная схема принудительного охлаждения наплавляемых заготовок, основанная на опускании стола с расположенным на нем подложки в хладагент с синхронизацией движения со скоростью роботизированной наплавки (рисунок 11).



а



б



в

а – математическая модель; б – стратегия печати; в - заготовка
Рисунок 10 - Получение заготовки «Кронштейн» из сплава СВАК5 способом ЭДН

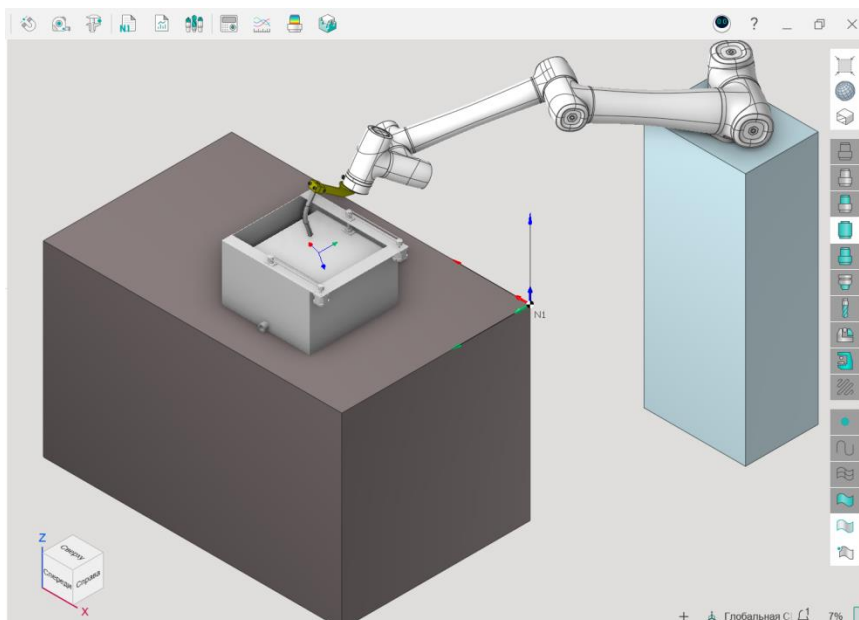


Рисунок 11 - Модель
комплекса
роботизированной ЭДН
с принудительным
охлаждением
направляемых слоев

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследовано влияние параметров электродуговой наплавки на геометрию, структуру и свойства заготовок из сталей марок 09Г2С и 06Х19Н9Т. Установлено, что жидкотекучесть и объемная усадка сталей марок 09Г2С и 06Х19Н9Т, обусловленные их химическим составом, влияют на геометрическую точность заготовок по отношению к электронно-геометрической модели: увеличение размеров при использовании стали 09Г2С с повышенной жидкотекучестью; уменьшение размеров при использовании стали 06Х19Н9Т с повышенной объемной усадкой.
2. Исследовано влияние режимов и параметров наплавки на структуру и физико-механические свойства заготовок из сплавов СвАМг5 и СвАК5. Установлено, что укрупнение дендритов и увеличение пористости в заготовках из сплавов СвАМг5 и СвАК5 происходит в последовательности **импульсный режим Cold Arc (ИР-СА)→импульсный режим (ИР)→непрерывный режим (НР)**, что связано с увеличением тепловложения и, как следствие, увеличением объема, величины перегрева, времени существования жидкой фазы и скорости охлаждения при затвердевании. Определены оптимальные параметры ЭДН.
3. Показано, что ростом температуры в интервале $20 \div 400$ °С КТЛР выращенных заготовок из сплава СвАК5 возрастает, что соответствует известной закономерности для теплового расширения доэвтектических сплавов Al-Si. Подтверждено влияние структурного фактора на характер изменения КТЛР: с увеличением размеров, структурных составляющих сплава КТЛР возрастает.
4. Выполнена оценка эффективности магнитно-импульсной обработки (МИО) и электродугового поверхностного модифицирования (ЭДПМ) на структуру и свойства заготовок из сплава СвАК5. Установлено, что жидкофазное (МИО) и твердофазное (ЭДПМ) воздействия оказывают устойчивое модифицирующее влияние на структуру и свойства сплава СвАК5. Доказана потенциальная возможность создания гибридных технологий, основанных на электрофизических способах. Определены оптимальные параметры при «ЭДН-МИО» и «ЭДН-ЭДПМ». Получен патент на конструкцию индуктора, совмещенного с газовой горелкой для реализации процесса «ЭДН-МИО».
5. Результаты исследований подтверждены опытно-промышленной апробацией. Выполнено восстановление просечных пуансонов из стали 9ХС: партия восстановленных пуансонов в количестве 10 шт. была признана годной и допущена для

дальнейшей эксплуатации. Показана принципиальная возможность получения заготовок из сплава СвАК5 по технологии ЭДН. Разработана модель комплекса роботизированной ЭДН с принудительным охлаждением наплавляемых слоев.

Основное содержание диссертации представлено в следующих работах:

Публикации в ведущих рецензируемых журналах:

1. Жаткин, С.С. Применение электродуговой наплавки для создания трёхмерных объектов из стали / С.С. Жаткин, К.В. Никитин, В.Б. Деев, С.С. Панкратов, Д.А. Дунаев // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 2020. – Т. 63, № 6. – С. 443–450. – DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-443-450. (**SCOPUS, Q4**)
2. Никитин, К.В. Исследование структуры и свойств наплавленных зон из присадочной проволоки Св-АК5 при роботизированной наплавке / К.В. Никитин, Д.А. Дунаев, С.С. Жаткин, В.И. Никитин // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2022. – № 4. – С. 67–74. (**SCOPUS, Q3**)
3. Никитин, К.В. Структура и свойства сплава Св-АК5 при импульсно-дуговой наплавке / К.В. Никитин, С.С. Жаткин, Д.А. Дунаев, Е.А. Минаков // Цветные металлы. – 2023. – № 11. – С. 76–82. (**SCOPUS, Q3**)
4. Дунаев, Д.А. Применение гибридного комплекса «объёмная электродуговая наплавка + поверхностное электродуговое упрочнение» для повышения характеристик алюминиевого сплава АК5 / Д.А. Дунаев, С.С. Жаткин, К.В. Никитин // Известия ВолгГТУ. – 2025. – № 6 (301). – С. 68–75. – DOI: 10.35211/1990-5297-2025-6-301-68-75. (**ВАК, K2**)

Патент:

1. Пат. RU 235516 U1. Индуктор для магнитно-импульсной обработки при объёмной электродуговой наплавке / К.В. Никитин, С.С. Жаткин, Д.Г. Черников, Д.А. Дунаев, А.К. Скороумов. – Заявлено: 11.11.2024. – Опубликовано: 04.07.2025.

Статьи в других изданиях:

1. Жаткин, С.С. Применение дуговой наплавки для получения 3D-объектов из стали 09Г2С / С.С. Жаткин, К.В. Никитин, С.С. Панкратов, Д.А. Дунаев, Е.А. Минаков // Металлургия машиностроения. – 2020. – № 6. – С. 29–31.
2. Панкратов, С.С. Применение сварочных аддитивных технологий для объёмной наплавки сталей в условиях ЦЛТ СамГТУ / С.С. Панкратов, Д.А. Дунаев, С.С. Жаткин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – № 3. – С. 62–68.
3. Дунаев, Д.А. Исследование возможности восстановления просечных штампов из стали 9ХС электродуговой наплавкой / Д.А. Дунаев, С.С. Жаткин, К.В. Никитин, Е.А. Минаков, С.В. Харченко // Металлургия машиностроения. – 2022. – № 3. – С. 36–40.
4. Никитин, К.В. Особенности объёмной электродуговой наплавки в аддитивных и восстановительных технологиях / К.В. Никитин, С.С. Жаткин, Д.А. Дунаев, Д.М. Юдин, Е.А. Минаков // Литейщик России. – 2023. – № 12. – С. 1–12.
5. Никитин, К.В. Исследование влияния WAAM-наплавки на структуру и коэффициент термического линейного расширения сплава АК-5 / К.В. Никитин, С.С. Жаткин, Д.А. Дунаев, Е.А. Минаков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 4(2). – С. 215–221.
6. Никитин, К.В. Повышение эффективности электродуговой наплавки сплава Св-АК5 за счёт гибридизации технологий / К.В. Никитин, С.С. Жаткин, Д.А. Дунаев, Д.Г. Черников, А.К. Скороумов, Е.А. Минаков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 4(2). – С. 289–297.

7. Никитин, К.В. Гибридные технологии при WAAM-наплавке / К.В. Никитин, С.С. Жаткин, Д.А. Дунаев, Д.Г. Черников // Литейное производство. – 2024. – № 6. – С. 12–17.
8. Никитин, К.В. Совершенствование процесса объёмной электродуговой наплавки сплава Св-АК5 / К.В. Никитин, Д.А. Дунаев, С.С. Жаткин, Д.А. Минаков, Д.Г. Черников // Литейщик России. – 2024. – № 4. – С. 3–8.
9. Дунаев, Д.А. Поверхностное модифицирование алюминиевого сплава АК5 с применением гибридной технологии «объёмная электродуговая наплавка + поверхностное электродуговое упрочнение» / Д.А. Дунаев, С.С. Жаткин, К.В. Никитин // Литейщик России. – 2025. – № 5. – С. 31–37.
10. Никитин, К.В. Применение магнитно-импульсной обработки при электродуговой сварке сплава АД1Н / К.В. Никитин, С.С. Жаткин, Д.А. Дунаев, Е.А. Минаков // Литьё и металлургия. – 2023. – № 4. – С. 101–108.
11. Панкратов, С.С. Исследование процесса формирования объектов, их структуры и свойств из присадочных материалов 09Г2С и 06Х19Н9Т объёмной дуговой наплавкой / С.С. Панкратов, Д.А. Дунаев, Д.М. Юдин, С.В. Харченко, С.С. Жаткин, К.В. Никитин // Современные аспекты в области исследований структурно-фазовых превращений при создании материалов нового поколения: материалы XII Всероссийской конференции, Москва, 07 февраля 2020 года. – М.: ВИАМ, 2020. – С. 343–351.
12. Дунаев, Д.А. Структура и свойства присадочной проволоки Св-АК5 при наплавке с применением WAAM-технологии / Д.А. Дунаев, К.В. Никитин // Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении: труды Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 24–26 мая 2022 г. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. – С. 220–223.
13. Дунаев, Д.А. Структура и свойства алюминиевого сплава Св-АК5 при наплавке WAAM-технологиями / Д.А. Дунаев, С.С. Жаткин, А.К. Ермаков // Перспективные материалы и технологии в авиадвигателестроении : материалы Всероссийской науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2023. – С. 392–398.
14. Никитин, К.В. Структура и свойства алюминиевого сплава системы Al-Mg при наплавке по WAAM-технологии / К.В. Никитин, С.С. Жаткин, Д.А. Дунаев, Е.А. Минаков // Прогрессивные литейные технологии: труды XII Междунар. науч.-практ. конф. – М.: НИТУ «МИСиС», 2024. – С. 458–464.
15. Никитин, К.В. Гибридизация технологии объёмной электродуговой наплавки для получения заготовок из алюминиевых сплавов системы Al-Si / К.В. Никитин, С.С. Жаткин, Д.А. Дунаев, Д.Г. Черников // Прогрессивные литейные технологии: труды XII Междунар. науч.-практ. конф. – М.: НИТУ «МИСиС», 2024. – С. 210–217.

Автореферат отпечатан с разрешения объединённого
диссертационного совета на базе 99.2.039.02
на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,
ФГАОУ «Самарский национальный исследовательский университет имени академика
С.П. Королева»
(протокол № 14 от «20» октября 2025 г.)
Заказ № _____. Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе.