

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

БИКТИМИРОВ РИНАТ МАРАТОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИТЫХ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИЗ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТХОДОВ**

Специальность 2.6.3 – Литейное производство

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Доктор технических наук, профессор
Никитин Константин Владимирович

Самара – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Состояние вопроса. Постановка целей и задач исследования.....	9
1.1 Применение алюминиевых сплавов в различных отраслях промышленности	9
1.2 Генезис и актуальность рециклирования металлоотходов на основе алюминия в современном литейном производстве	14
1.3 Управление структурой и свойствами алюминиевых сплавов на основе явления структурной наследственности.....	24
1.4 Цели и задачи исследования.....	26
2 Методика исследования.....	28
2.1 Общая методика исследования. Объекты и предметы исследования.....	28
2.2 Основные материалы, оборудование и методы исследования структуры и свойств литых изделий.....	32
3 Исследование влияния основных параметров рециклирования алюминиевых отходов на качество переплавов.....	39
3.1 Разработка критериев оценки качества низкосортных алюминиевых отходов.....	39
3.2 Влияние параметров прямого переплава стружки на структуру и свойства предварительного сплава АК9ч.....	46
3.3 Влияние параметров прямого переплава отходов на структуру и свойства предварительных сплавов системы Al-Mg.....	59
Выводы по главе 3.....	64
4 Исследование влияния вида и количества отходов на структуру и свойства синтезированных сплавов на основе алюминия.....	66
4.1 Синтезирование алюминиевых сплавов на основе критериев качества металлоотходов.....	66

4.2	Исследование влияния вида и количества отходов на модифицируемость синтезируемых сплавов	74
4.3	Разработка технологии синтеза алюминиевых сплавов с максимальным вовлечением отходов в состав шихты.....	89
	Выводы по главе 4.....	99
5	Опытно-промышленная апробация результатов исследования.....	101
5.1	Разработка технологии изготовления припойного сплава системы Al-Cu-Si на основе рециклируемых отходов.....	101
5.2	Разработка технологии и изготовление отливок из синтезированного сплава АК7ч литьем по выплавляемым моделям	111
	Выводы по главе 5.....	127
	Заключение. Общие выводы по работе.....	129
	Список литературы.....	132
	Приложение А.....	146
	Приложение Б.....	147
	Приложение В.....	148
	Приложение Г.....	149
	Приложение Д.....	150
	Приложение Е.....	151
	Приложение Ж.....	152
	Приложение З.....	153

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Сплавы на основе алюминия широко применяются для изготовления изделий практически для всех отраслей мировой промышленности: электроэнергетики, строительства, автомобиле- и машиностроения, оборудования, тары и упаковки и т.д.

В связи с истощением невозобновляемых природных ресурсов (в первую очередь рудных запасов цветных металлов) и высокой стоимостью первичных шихтовых металлов для приготовления алюминиевых сплавов остро встают вопросы по рациональному использованию и увеличению доли рециклируемых металлоотходов в металлургическом и литейном производствах.

Поэтому, *актуальными* становятся задачи по разработке комплекса технологических решений, направленных на обеспечение гарантированного уровня качества литой продукции из, так называемых, «вторичных» алюминиевых сплавов. Данное направление соответствует ряду положений Стратегии научно-технологического развития РФ до 2035 г. и Отраслевой программе «Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в промышленном производстве» на период до 2030 г. (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.11.2022 г. №13493п-П11).

Работа выполнена в рамках реализации программ сотрудничества с ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара), АО «Авиаагрегат» (г. Самара) и ЗАО «Плавка и пайка» (г. Москва).

Основная часть исследований, экспериментов и испытаний выполнена на базе «Центра литейных технологий» (ЦЛТ) и Центра коллективного пользования «Исследование физико-химических свойств веществ и материалов» ФГБОУ ВО СамГТУ. Опытная продукция производилась в Центре литейных технологий ФГБОУ ВО СамГТУ (г. Самара) с последующей поставкой и оценкой качества на промышленных предприятиях.

Целью исследования является разработка комплекса технологических решений, направленных на производство литых изделий различного назначения из

алюминиевых сплавов, синтезированных с использованием металлических отходов.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи**:

1. Исследовать качество алюминиевых отходов в виде стружки и баночных ломов.
2. Разработать критерии качества исследованных алюминиевых отходов.
3. Разработать технологические этапы синтезирования алюминиевых сплавов из исследованных отходов.
4. Исследовать структуру и свойства синтезированных сплавов систем Al-Si, Al-Mg и Al-Cu-Si.
5. Разработать технологический процесс получения литой продукции и провести опытно-промышленные испытания.

Научная новизна.

1. *Предложены и обоснованы дополнительные критерии* качества дисперсных отходов на основе алюминия (баночный лом, сыпучая стружка литейных сплавов и вьюнообразная стружка деформируемых сплавов: критерий чистоты ($k_{\text{ч}}$), критерий контакта поверхности отходов с атмосферой печи ($k_{\text{А}}$) и критерий максимально возможного извлечение металла ($M_{\text{Ме}}$). Экспериментально подтверждена адекватность предложенных дополнительных критериев качества.

2. *Установлено, что* вовлечение в состав шихты отходов деформируемых сплавов обуславливает повышение эффективности модифицирования сплавов АК9ч и АМгбл при сокращении расхода лигатур AlSr (на 25%) и AlTi (на 30%).

3. *Выявлена экспериментальная закономерность, показывающая* влияние деформированных отходов (Д-шихты) и содержания водорода на плотность сплавов в жидком состоянии. Меньшим газосодержанием и повышенной плотностью характеризовались расплавы, полученные с применением Д-шихты. Установленные эффекты объяснены сохранением структурной информации в системе «шихта-расплав-литое изделие».

Практическая значимость.

1. *Предложены* комплексные технологические схемы переплава сыпучих (литейные сплавы) и вьюнообразных (деформированные сплавы) стружек, обеспечивающие металлургический выход годного 93-97% и химический состав в соответствии с требованиями ГОСТ 1583-93.

2. *Разработаны* технологические инструкции ТИ-ЛВТ-9 «Рециклирование сыпучей стружки литейных сплавов системы Al-Si» и ТИ-ЛВТ-10 «Рециклирование вьюнообразной стружки деформируемых сплавов систем Al-Mg, Al-Cu».

3. *Предложены комплексные технологические схемы* получения рабочих сплавов АК9ч, АК12, АМгбл, соответствующих требованиям ГОСТ1583-93 по химическому составу, с максимальным (80-100%) вовлечением в составы шихт деформированных ломов и отходов. Сплавы характеризуются измельченными параметрами основных структурных фаз и повышенными механическими свойствами.

4. *Разработана и освоена технология* получения припойного сплава А34 в виде литых прутков малых сечений в условиях Центра литейных технологий ФГБОУ ВО СамГТУ (технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-11 «Изготовление мелкокристаллического пруткового припоя А34»).

5. *Разработана* технология производства отливок литьем по выплавляемым моделям из синтезированного сплава АК7ч (технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-12 «Синтезирование сплава АК7ч с применением деформированных отходов»).

Объектом исследования являются технологии синтезирования алюминиевых сплавов из отходов.

Предметом исследования является литая продукция, получаемая из синтезированных алюминиевых сплавов.

Реализация результатов работы в промышленности. В Центре литейных технологий организовано малотоннажное производство литых припоев марки А34 (система Al-Cu-Si) в виде прутков с поставкой продукции по заказу ЗАО «Плавка и пайка» (г. Москва). Пилотные партии отливок из сплавов АК7ч были изготовле-

ны литьем по выплавляемым моделям в Центре литейных технологий и поставлены на АО «Авиаагрегат» (г. Самара). Результаты опытно-промышленных испытаний подтверждены соответствующими актами.

Положения, выносимые на защиту.

1. Дополнительные критерии качества алюминиевых отходов: $k_{\text{ч}}$, $k_{\text{А}}$, $M_{\text{Ме}}$.
2. Комплексные технологические схемы переплава стружек литейных и деформируемых алюминиевых сплавов.
3. Комплексные технологические схемы получения рабочих сплавов АК9ч, АК12, АМГбл с максимальным (до 100%) вовлечением в составы шихт алюминиевых отходов.
4. Результаты опытно-промышленных испытаний в условиях ЦЛТ СамГТУ и промышленных предприятий.

Методы исследования. Работа выполнена с использованием современных методик исследования и аналитического оборудования для исследования структуры и свойств сплавов; моделирование гидродинамических и кристаллизационных процессов выполнялось с применением лицензионных систем автоматизированного моделирования литейных процессов (САМ ЛП LVMFlow); статистическая обработка результатов исследований осуществлялась с использованием методов статистического анализа в программе Microsoft Excel 2010 и «STATGRAPHICS».

Достоверность и обоснованность полученных результатов, выводов и разработанных технологий основана на применении современных методов исследований и аналитического оборудования Центра коллективного пользования «Исследование физико-химических свойств веществ и материалов» ФГБОУ ВО СамГТУ, Центральной заводской лаборатории АО «Авиаагрегат» (г. Самара); использовании лицензионных систем автоматизированного моделирования литейных процессов; соответствии результатов исследований, полученных автором, результатам других исследователей в этой области; практической реализации полученных результатов, опытно-промышленных испытаниях и актах внедрения разработанных технологических решений.

Личный вклад автора заключается в формулировании целей и задач исследования, их теоретическом обосновании, проведении экспериментальных исследований, анализе полученных результатов и их обобщении, разработке технологических решений, участие в опытно-промышленных испытаниях, написании статей.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических мероприятиях: 8-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Наследственность в литейно-металлургических процессах» (2018 г., Самара); международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии в литейном производстве» (2019 г., Москва); XII-й Всероссийской конференции «ТестМат» (2020 г., г. Москва); Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Перспективные материалы и технологии в авиадвигателестроении 2023» (2023г., Самара).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 работ, в том числе 8 статей в изданиях из перечня ведущих научных журналов, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования (WOS и SCOPUS), 1 лабораторный практикум.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам направлений исследований из паспорта специальности 2.6.3-Литейное производство: **пункту 1:** «Исследование физических, химических, физико-химических, теплофизических, технологических, механических и эксплуатационных свойств материалов, как объектов и средств реализаций литейных технологий»; **пункту 3:** «Исследование процессов формирования структуры и свойств литых заготовок, литейных сплавов и материалов, формовочных и стержневых смесей»; **пункту 10:** «Ресурсосбережение, регенерация и вторичное использование сплавов, материалов и отходов литейного производства».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из 5 глав, заключения и основных выводов, списка литературы и 8 приложений. Изложена на 154 страни-

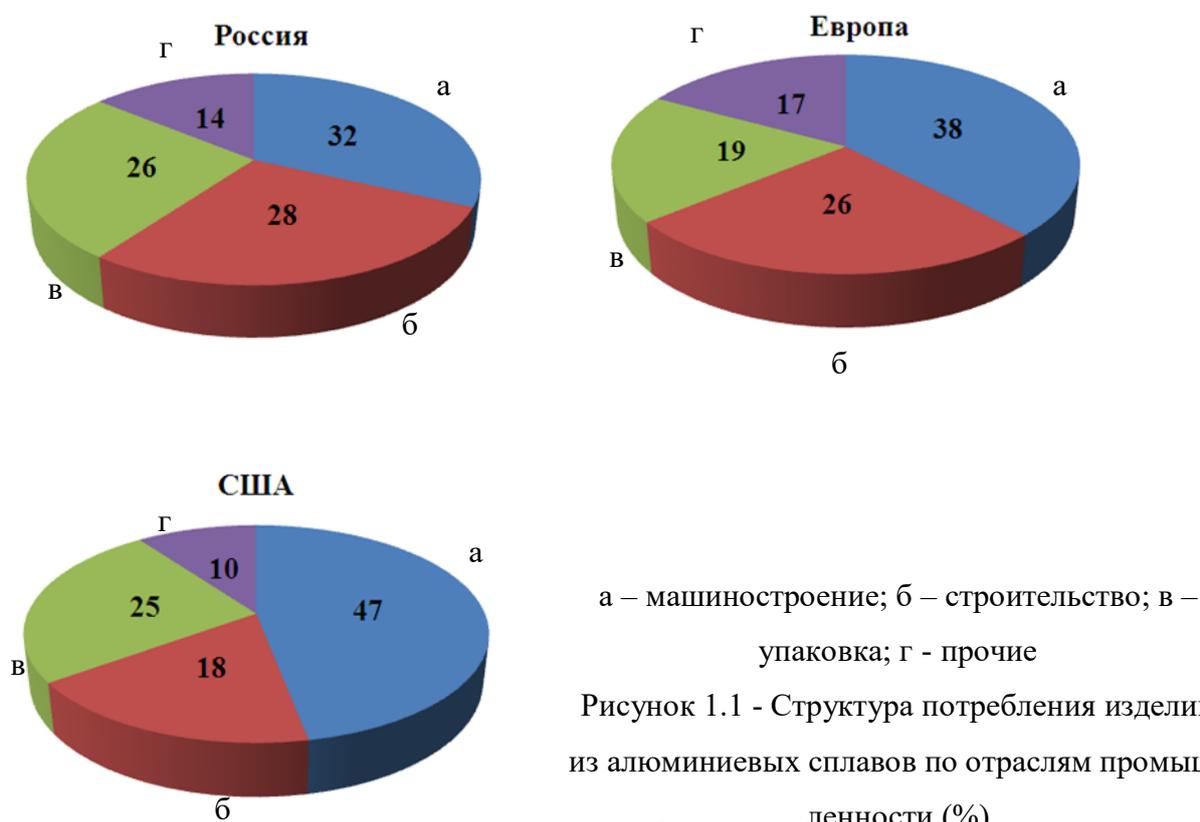
цах (включая приложения), содержит 59 рисунков, 38 таблиц, а также список литературы из 122 наименований.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЦЕЛЕЙ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Применение алюминиевых сплавов в различных отраслях промышленности

Сплавы на основе алюминия широко применяются для изготовления изделий практически для всех отраслей мировой промышленности: электроэнергетики, строительства, автомобиле- и машиностроения, оборудования, тары и упаковки и т.д.

Сравнительный анализ потребления изделий из алюминия по отраслям (рис. 1.1.) показывает, что основная доля (32-47 %) приходится на машиностроение в целом (включая, автомобиле-, самолето- и судостроение) [1-4].



Второе место по потреблению алюминия в России и Европейских странах занимает строительство (28 и 26%, соответственно). Существенная доля алюминия потребляется на изготовление различных видов упаковки (19-26%).

По данным аналитиков Алюминиевой ассоциации России (АА) основными драйверами в потреблении алюминиевых изделий являются: автомобилестроение, судостроение, вагоностроение и строительство [5].

Алюминиевые сплавы в автомобилестроении [5-7]. В современных легковых автомобилях, в зависимости от марки, доля литых деталей из сплавов различных систем может достигать до 40-70% по массе. Стоимость литых деталей составляет до 20% от общей стоимости автомобиля. В современных зарубежных моделях – масса деталей из алюминиевых сплавов достигает 110-200 кг. В отечественных – не превышает 40-50. Соответственно, основная тенденция в мировом автомобилестроении направлена на увеличение доли изделий из легких сплавов – алюминия и магния. Для примера, отливка блока цилиндров из чугуна, в среднем, весит 72 кг, из алюминиевого сплава – 23 кг. После механической обработки деталь из чугуна будет весить 44 кг, из алюминия – 14 кг. Только на одной позиции при замене чугуна на алюминиевый литейный сплав, возможно обеспечить трехкратное снижение массы. В свою очередь, по мнению аналитиков, при общем снижении массы автомобиля на каждые 10% обуславливает экономию бензина в 6%. Таким образом, замена чугунных и стальных (в том числе и кузов) деталей на детали из легких сплавов позволит снизить массу автомобиля в среднем на 62-63%. В итоге, на 100 км пробега это позволит экономить 2-3 литра бензина [6]. Основным сдерживающим фактором по увеличению доли деталей из алюминиевых сплавов является разница в стоимости исходных материалов – себестоимость чугуна и стали значительно ниже алюминия. Из литейных алюминиевых сплавов для производства отливок автомобильного назначения, в большей степени, используются сплавы систем Al-Si, Al-Si-Cu, Al-Si-Cu-Ni. Из них производят колесные диски, головки блоков цилиндров и сами блоки, поршни, корпуса картеров рулевого управления и коробки передач. В настоящее время наметилась тенденция к изготовлению деталей из алюмоматричных композиционных сплавов на ос-

нове системы Al-Si. Повышенную износостойкость, низкий коэффициент термического линейного расширения и длительный срок эксплуатации придают изделиям с помощью армирования алюминиевой матрицы небольшими добавками карбида кремния или титана. Деформируемые алюминиевые сплавы пока в меньшей мере применяются из-за их высокой стоимости по сравнению с изделиями из стали. Но в перспективе прогнозируется увеличение доли изделий из алюминиевых деформируемых сплавов при изготовлении навесных элементов кузовов и самих кузовов.

Алюминиевые сплавы в аэрокосмической технике [5-8]. До 60-90% изделий из алюминиевых сплавов применяют при изготовлении планеров, вертолетов и самолетов, летающих на скоростях до 2500 км/ч. Из алюминиевых сплавов изготавливают жидкостные и твердотопливные ракеты и спутники. Например, доля изделий из деформируемых алюминиевых сплавов в самолете Ил-18 составляла 73%, а из стали – всего 23%. Как правило, в аэрокосмической технике используют деформированные полуфабрикаты из высокопрочных сплавов, упрочняемых термообработкой (Д16, В95, В 93 и т.д.). Доля литейных сплавов в самолетных конструкциях составляет 3-5%. Из них получают различными способами литья корпуса двигателей, поршни, головки блоков двигателей, детали топливной аппаратуры, навесные элементы шасси).

Алюминиевые сплавы в судостроении [5, 7-9]. Применение алюминиевых сплавов позволяет существенно облегчить судно (в среднем до 50%), увеличить его грузоподъемность и улучшить эксплуатационные характеристики (увеличить скорость, маневренность, срок службы). Особенно это актуально для морских судов.

Изделия из алюминиевых сплавов используют для строительства корпусов плавающих средств и судовых надстроек. Из деформируемых сплавов систем Al-Mn, Al-Cu-Mg и Al-Mg для судостроения производят листы толщиной до 10 мм, плиты толщиной более 10 мм, а также профили, цельнопрессованные панели и трубы.

Из литейных сплавов (в основном, системы Al-Si) различными способами литья производят корпуса подвесных моторов лодок и яхт и дизельных двигателей большегрузных судов.

Алюминиевые сплавы в вагоностроении [5-8, 10, 11]. Наиболее перспективным считается использование деформированных полуфабрикатов из алюминиевых деформируемых сплавов в качестве несущих элементов каркасов вагонов и их обшивки. Например, использование указанных элементов позволяет создавать двухэтажные пассажирские вагоны, коррозионостойкие грузовые вагоны для твердых сыпучих и жидких агрессивных грузов. В связи с тем, что сборка элементов таких вагонов целесообразна с применением сварки, то используются сплавы системы Al-Mg, дополнительно легированные другими элементами (например, скандием). Создание «алюминиевых» вагонов соответствует стратегии развития железнодорожного транспорта РФ до 2030 г. [12] Известно, что «алюминиевые» вагоны имеют жизненный цикл до 40 лет и меньший, практически, на 40% вес по сравнению со стальным вагоном. Кроме того, применение легких пассажирских вагонов может обеспечить увеличение скорости движения состава по железнодорожной магистрали до 160 км/ч вместо имеющихся 72 км/ч.

Алюминиевые сплавы в электротехнике [5, 6, 8, 13]. Наибольший объем алюминиевых сплавов в электротехнике используется для изготовления проводов линий электропередач (ЛЭП). Это объясняется тем, что стоимость алюминия в ЛЭП составляет всего 1/2-1/3 стоимости медного провода при равной электрической проводимости. Кроме того, существенно меньший вес алюминиевого провода позволяет ставить опоры ЛЭП на большие расстояния по сравнению с медными проводами. Наиболее широкое применение получили алюминиевые провода из нелегированного алюминия марок АЕ, АД0, АД00. Однако, при достаточно высокой электрической проводимости они обладают невысокой прочностью, в связи с чем в сердцевину кабеля располагают стальной корд. Для уменьшения сечения армирующего корда ведутся работы по получению высокопрочных сплавов для ЛЭП. В основном эти работы направлены на микролегирование вышеуказан-

ных марок алюминия добавками, например, циркония, которые в малых количествах не ухудшают электрических свойств материала.

Алюминиевые сплавы в строительстве [5, 6, 8, 14, 15]. Использование алюминиевых конструкций в строительстве способствует существенному снижению нагрузки на фундамент при строительстве высотных домов и различных сооружений большой площади. По данным экспертов, срок службы алюминиевых несущих конструкций может составлять до 300 лет, а здания, построенные с их использованием, могут выдержать землетрясение магнитудой до 9 баллов. Полуфабрикаты из алюминиевых деформируемых сплавов широко применяются для возведения опалубки при строительстве монолитных домов. Причем, элементы конструкции «алюминиевой» опалубки могут использоваться неоднократно, а затем легко рециклироваться. Для повышения эффективности теплоизоляции применяются несущие каркасы из алюминиевых профилей, в промежутки между которыми укладываются современные легкие теплоизолирующие материалы, с последующей декоративной обшивкой лакированными алюминиевыми листами или композитными панелями на их основе. Алюминиевые конструкции применяются в строительстве в качестве монтажного оборудования (например, опалубка), элементов несущих каркасов, ограждений, оконных рам. Основными сплавами, из которых изготавливают указанные изделия, являются алюминиевые деформируемые сплавы. В качестве элементов конструкций изделия применяют: в стационарных неподвижных конструкциях перекрытий большепролетных зданий при наличии агрессивных сред (отделения промышленных сооружений), а также в перекрытиях общественных зданий (авто- и аэровокзалов, выставочных павильонах и т.д.); в несущих подвижных конструкциях (каркасы и обрешетки крупноразмерных ворот, разводных пролетов мостов, затворах гидротехнических сооружений); в сборно-разборных конструкциях небольших зданий, павильонов, киосков; в переплетах оконных рам для стеклопакетов.

Основными марками сплавов для изготовления указанных изделий являются, в основном, сплавы систем Al-Cu-Mg и Al-Mg, из которых обработкой давлением получают листы, плиты, панели, а также профили различной конфигурации.

Расширяется применение легкие алюминиевых конструкций при строительстве новых мостов, а также при реконструкции или расширении существующих. Наиболее перспективными считаются сплавы систем Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg, Al-Mg.

Алюминиевые сплавы в упаковке и таре [5, 6, 8]. Данный сегмент промышленности также является достаточно емким потребителем алюминиевых сплавов. В медицинской упаковке используют в основном нелегированный алюминий в виде фольги. Наиболее динамично развивающимся направлением является производство баночной тары под напитки. Для этой цели используют сплавы системы Al-Mn (корпус банки) и Al-Mg (открывающий ключик).

Изделия из алюминиевых сплавов используются также в **нефтехимической** и **атомной** промышленности, но доля изделий из алюминия и его сплавов в данных отраслях существенно ниже по сравнению с рассмотренными ранее отраслями промышленности [6, 8, 16,17].

Таким образом, изделия из сплавов на основе алюминия находят широкое применение во многих отраслях промышленности. В последние годы, благодаря мерам государственной поддержки намечается устойчивая тенденция по увеличению объемов потребления алюминия [18].

1.2 Генезис и актуальность рециклирования металлоотходов на основе алюминия в современном литейном производстве

Основные задачи повышения эффективности литейного производства были поставлены в известной парадигме выдающегося ученого-литейщика Гуляева Б.Б. в конце XX-го века: *Как получить расплав и отливку заданного качества при минимальных затратах материалов, энергии, труда и минимальном загрязнении среды* [19]?

Часть указанных проблем можно эффективно решать за счет рационального использования образующихся в заготовительных и обрабатывающих производствах металлоотходов.

Согласно ГОСТ 30772-2001 *рециклинг* определяется, как процесс возвращения отходов, сбросов и выбросов в процессы техногенеза [20]. Другими словами, *рециклингом* называют любой способ утилизации, в результате которого материалы отходов подвергают переработке, делая изделия, материалы или вещества пригодными для их повторного использования.

Сокращение запасов невозобновляемых природных ресурсов и, как следствие, возрастающий дефицит первичных металлов обуславливают актуальность исследований по более глубокой переработке и увеличению доли рециклируемых металлов и сплавов в металлургическом и литейном производствах.

По данным [21] средний уровень использования промышленных отходов в России составляет 36%, а твердых бытовых отходов – около 3,5%. При этом, переработка и рециклирование отходов черных и цветных металлов характеризуется достаточно высоким уровнем использования – свыше 88% в общей доле промышленных отходов [22]. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что металлические материалы способны сохранять (наследовать) структуру, физические свойства и, частично, химический состав в сложной взаимосвязанной системе металлооборота в процессах металлургии, литейного производства, машиностроения. Данный «кругооборот» получил название «генезис в шихтовых металлах» (рис. 1.2) [23].

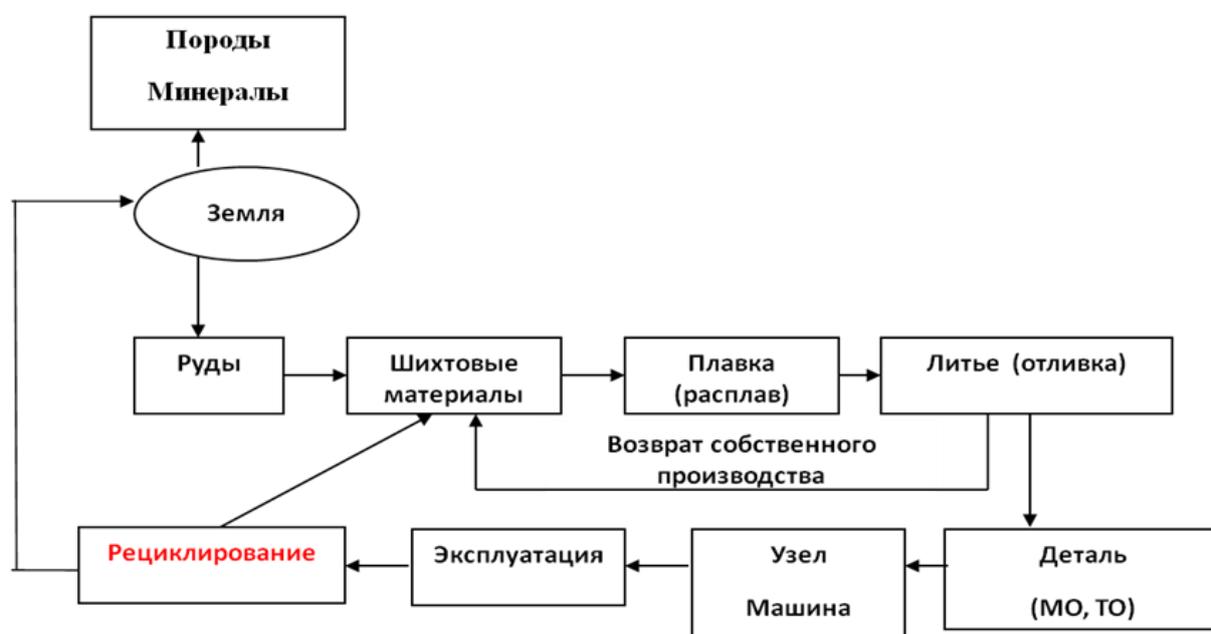


Рисунок 1.2- Генезис шихтовых материалов [23]

Актуальность процессов «вторичной» металлургии обусловлена еще и существенной разницей в энергетических затратах при производстве продукции из первичных и рециклируемых металлов. Например, на производство первичного алюминия затрачивается энергии равной 190 МДж/т, а на производство рециклируемого алюминия – 20 МДж/т [24, 25].

Анализ открытых источников информации по рециклируемым металлам и сплавам показывает, что наибольшую долю во вторичной цветной металлургии занимают такие дефицитные металлы (и сплавы на их основе), как алюминий и медь. Гораздо меньше представлены отходы на основе цинка, титана, свинца, никеля и т.д.

Сравнительный анализ химических составов, например, литейных сплавов системы Al-Si показывает, что в зарубежных аналогах содержание некоторых примесных элементов выше по сравнению с российскими сплавами (табл. 1.1). Наиболее характерными примесями для вторичных алюминиевых сплавов являются железо и цинк.

Таблица 1.1 - Химический состав отечественных силуминов и их зарубежных аналогов [6]

Марка сплава	Стандарт	Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn	Ni	Ti	Pb
AK12M2	ГОСТ 1583	11-13	1,8-2,5	0,6-0,9	<0,2	<0,5	<0,8	<0,3	<0,2	<0,15
A385.1	AA(США)	11-13	2,0-4,0	<1,1	<0,3	<0,5	<2,9	<0,5	-	-
A385.0	AA(США)	11-13	2,0-4,0	<2,0	<0,3	<0,5	<3,0	<0,5	-	-
AK12MMгH	ГОСТ 1583	11-13	0,8-1,5	<0,7	0,85-1,35	<0,2	<0,2	0,8-1,3	-	<0,05
G-ALSi12(Cu)	DIN1725 (Германия)	10,5-13,5	<1,0	<0,8	<0,3	0,1-0,5	<0,5	<0,2	<0,15	<0,2
AK6M2	ГОСТ 1583	5,5-6,5	1,8-2,3	<0,5	0,35-0,50	<0,1	<0,06	<0,05	0,1-0,2	-
AC2B	JIS H5202 (Япония)	5,0-7,0	2,0-4,0	<1,0	<0,5	<0,5	<1,0	<0,35	<0,2	<0,2

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в зарубежных странах доля использования рециклируемых алюминиевых отходов при производстве сплавов намного выше, чем в России. По данным [25] количество потребляемого вто-

ричного алюминия в общем потреблении алюминия в развитых странах превышает 30% (США – 34,8%; Германия – 35,1%; Япония – 34,8%), в России – 10,6% (табл. 1.2).

Таблица 1.2 - Использование рециклированного алюминия в производстве литой продукции по странам

Страна	Общее потребление алюминия, тыс. т	В т.ч. рециклированного алюминия, тыс. т	Доля рециклированного алюминия, %
США	8412,0	2296,0	34,8
Германия	2519,0	888,4	35,1
Япония	3564,0	1240	34,8
Россия	528,0	56,0	10,6

Отличие европейского подхода в рециклировании отходов из цветных металлов и сплавов на их основе от российского заключается, в первую очередь, в использовании более современного и технологичного оборудования на всех этапах рециклирования.

Существенным сдерживающим фактором во внедрении и развитии наукоемких технологий на российских предприятиях вторичной металлургии являются устаревшие ГОСТы, регламентирующие требования к качеству сплавов. Например, в ГОСТ 1583-93 [26] предъявляются минимальные требования к литейным алюминиевым сплавам в чушках, заключающиеся, в основном, в регламентации химического состава и балла пористости. Заниженный (по отношению к современным требованиям технологий и техники) уровень регламентируемых механических свойств в отливках также не способствует развитию современных технологий и стремлению производителей к их внедрению на своих предприятиях.

Основные требования к металлоходам на основе цветных металлов изложены в ГОСТ 54564-2011 «Лом и отходы цветных металлов и сплавов» [27]. Требования данного стандарта на лом и отходы цветных металлов и сплавов на их основе, которые могут в дальнейшем использоваться для марочных сплавов и

другой литой продукции. Материалы, имеющие потенциал к дальнейшему рециклированию, структурированы по наименованию металлов. Принадлежность к определенной группе определена на основании характеристики отходов по виду (природе происхождения) и маркам сплавов на основании нормативных показателей по содержанию металла (металлургический выход), засоренности и геометрических параметров (размеров). Таким образом, все лома и отходы на основе алюминия классифицированы на 38 групп по снижению отдельных качественных (нормативных) показателей. Например, в группу А1 входят чистые отходы из не легированного алюминия марок А85, А8 вплоть до АД, образовавшиеся в процессе обработки давлением (прокат, профиль, трубы, листы, ленты и т.д.). Регламентируемое содержание металла по массе должно быть не менее 98%, засоренность безвредными примесями по массе – не более 2%. Засоренность железом не допускается. Толщина отходов – не менее 1 мм. В группу А38 включен дробленый лом алюминиевых банок (марки сплавов АМг2, АД31, АД0 и др.) из-под напитков (отмагниченный, при отсутствии пластиковой тары, стекла и дерева). При этом, содержание металла по массе должно быть не менее 95%, засоренность свинцом не допускается, засоренность железом по массе – не более 0,2%, засоренность безвредными примесями по массе – не более 5%.

Таким образом, широкое применение, а также увеличение потребления изделий из алюминия и сплавов на его основе в различных отраслях промышленности предопределяет образование самых различных видов отходов, как непосредственно в производстве, так и в процессе эксплуатации, которые подлежат рециклированию. Образующиеся отходы различаются по происхождению, форме, степени дисперсности и содержанию металлической части. По оценкам экспертов, в процессах вторичной металлургии только в мировой алюминиевой промышленности ежегодно образуется около 5 млн. т отходов [29].

С позиции явления структурной наследственности отходы могут содержать в себе, как положительную, так и отрицательную структурную информацию [23]. Примеры использования отходов с применением основных закономерностей структурной наследственности широко представлены в работах [23, 30, 31].

Развитие автомобилестроения инициирует увеличение количества исследований, направленных на разработку технологий по эффективному рециклингу алюмосодержащих отходов [32, 33]. Как правило, отходами автомобилестроительной отрасли является, так называемый, «старый» лом (*old scrap*), т.е. отходы, образовавшиеся после эксплуатации и утилизации автомобильной техники. «Новый» (*new scrap*) моторный лом образуется непосредственно в литейных цехах в процессе производства литой продукции: бракованные отливки, элементы литниково-питающих систем. К этой группе ломов относится, в основном, моторный лом, который имеет литое происхождение и состоит, как правило, из сплавов системы Al-Si. В процессе подготовки к рециклингу моторный лом («старый» лом) подвергается следующим основным подготовительным операциям [6]:

- разделение по внешнему виду: детали головок блоков, блоки и картеры отделяют от поршневой группы. Это связано с тем, что поршни получают из сплавов с повышенным содержанием кремния (от 10 до 20%). Поршневые сплавы, как правило, характеризуются повышенной степенью легированности: в них в зависимости от вида поршней могут содержаться медь, магний, никель, хром и т.д. Остальные детали моторной группы получают из сплавов I и II групп по ГОСТ1583-93 и могут перерабатываться совместно;

- дополнительно могут быть отделены детали, полученные литьем под давлением. Как правило, данным способом литья получают отливки из сплавов АК9М2 и АК12М2 с высоким содержанием железа;

- по возможности из моторных ломов извлекают железосодержащие приделки: остатки шпилек, болтов, вкладыши и вставки;

- крупногабаритные отходы могут подвергаться измельчению на прессножницах, гидравлических ножницах или различного вида дробилках;

- для выделения из моторного лома элементов, полученных из сплавов других систем используют специальные экспресс-анализаторы химического состава.

«Новый» лом сортируется по маркам сплавов и вовлекается в рециклинг в качестве возврата собственного производства.

Отходы из деформируемых сплавов также подразделяются на «старый» и «новый» лом. К «старому» лому относятся отходы, образовавшиеся после эксплуатации строительных конструкций, несущих элементов техники, корпусные элементы судов, вагонов и т.д. Такие отходы собираются на предприятиях вторичной металлургии и после разделения по сортам измельчаются и подвергаются пакетированию. «Новый» лом перерабатывается, в основном, на крупных металлургических заводах, где производятся деформируемые полуфабрикаты.

Отходы электротехнической промышленности (электрокабели, провода, изоляция и т.д.) относятся к «старому» лому. При подготовке к рециклированию такие отходы требуют освобождения от изоляции и брони. В большинстве случаев изоляция является материалом на основе поливинилхлоридов. Ее отделяют с помощью специальных штаб-аппаратов с одновременным измельчением, сепарацией и направляют на свой специфический рециклинг. Отходы электротехнической промышленности относятся к наиболее чистым по химическому составу, т.к. для их изготовления применяют нелегированный алюминий.

Одним из наиболее сложных для переработки отходов является стружка, которая относится к «новому лому». Это связано с тем, что в процессе образования стружки, она смешивается со смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ), засоряется железосодержащими приделками от износа режущего инструмента. В процессе складирования стружки в нее могут попадать стружка из железосодержащих сплавов, ветошь, бумага, древесина и т.д. В литейных цехах в силу выше-названных причин стружка не используется в качестве возврата собственного производства, а сдается на специализированные предприятия вторичной металлургии. Сыпучая стружка образуется при механической обработке изделий из литейных сплавов, вьюнообразная – из деформируемых сплавов. Поэтому, в первую очередь, такие стружки разделяются по видам. Далее осуществляется их очистка от СОЖ, магнитная сепарация, разделение по фракциям. После чего подготовленная стружка направляется на переплав [6].

Наиболее сложным видом отходов для рециклирования являются металлошлаки. По мнению экспертов, ежегодно в Российской Федерации образуется

около 100 тыс. т Al-содержащих солевых шлаков [34] при производстве первичного алюминия и сплавов на его основе, а также на предприятиях вторичной металлургии при переработке ломов и отходов. По данным исследователей количество шлака может составлять до 500 кг на 1 т Al-сплава в зависимости от рециклируемых продуктов [29, 35]. Солевые шлаки в основном образуются при рециклировании алюминиевых ломов и отходов в наклонных печах роторного типа под слоем расплавленных солевых флюсов [36–38]. Шлаки относятся к «новым» ломам», но перерабатываются исключительно на специализированных предприятиях.

Вышеперечисленные операции являются типовыми в процессах рециклинга «новых» и «старых» ломов на основе алюминия. Обобщая, можно отметить, что в процессах рециклинга присутствуют следующие основные процессы: сортировка ломов и отходов по группам; разделка и подготовка к плавлению; плавление и приготовление сплава, включающие фильтрацию и дегазацию расплава от нерастворимых и растворимых неметаллических включений, а также доведение химического состава до требований нормативной документации; заливка расплава в формы (как правило, в изложницы различного объема) [25, 39, 40–47].

Ставшие уже традиционными, переплавы дисперсных отходов в расплавах галоидных солей [8] являются достаточно эффективными по извлечению металлической части. Но при этом получают, как правило, предварительные сплавы, требующие доведения до марочного химического состава. И, кроме того, указанные технологии являются экологически вредными для окружающей среды.

Исследована возможность получения проволок из рециклируемых стружек сплавов марок АД31 и АК12 [48] и банок из-под напитков (сплав АА3004) [49], минуя процессы расплавления, за счет использования непрерывного прессования сыпучих материалов на базе метода «Конформ». Определены наиболее оптимальные режимы прессования, при которых достигается сочетание оптимальных параметров структуры и механических свойств проволок. Прессованная сварочная проволока диаметром 2 мм, полученная из стружки сплава АК12, прошла успешные опытно-промышленные испытания в производственных условиях [48].

В работах [50-54] исследовали возможность получения лигатуры системы Al-Mg-Si в процессе рециклирования металлизированных алюминиевых отходов. На основании проведенных исследований разработан способ применения соединения $MnCO_3$, предназначенного для модифицирования и рафинирования расплавов системы Al-Mg-Si от неметаллических и газовых включений, взамен соединений на основе хлора и фтора. Разработана технология получения лигатуры Al-Mg-Si с получением побочного продукта в виде сыпучего мелкодисперсного шлака, пригодного для последующего использования в других отраслях промышленности.

В процессах получения сплавов на основе алюминия наибольшее применение находят отходы на основе алюминия и меди [23, 30, 31]. Использование рециклируемых отходов, содержащих железо или на его основе, при производстве литейных и деформируемых алюминиевых сплавов сдерживается, в основном, негативным влиянием железа на структуру и свойства алюминиевых сплавов. Алюминиевые отходы с высоким содержанием железа рециклируются, в основном, для производства раскислителей (сплавы типа АВ), которые применяются при производстве сталей. Однако, сплавы системы Al-Fe все-таки представляют практический интерес благодаря низкой диффузионной способности Fe в алюминии. Использование добавок железа в виде пудры на свойства алюминия, полученного из переплава электротехнических отходов, показало, что при добавлении 1% железной пудры существенно возрастают предел прочности, относительное удлинение и твердость такого сплава в литом состоянии [55].

Применение повышенных скоростей охлаждения при кристаллизации расплавов позволяет обеспечить формирование компактной дисперсной морфологии железосодержащих фаз взамен неблагоприятной игольчатой морфологии [56].

В целом, при разработке технологий рециклирования алюминиевых ломов и отходов упор делается на повышение эффективности рафинирующих флюсов, используемых при ведении плавки и плавильного оборудования [57].

Как было сказано выше, с наибольшими проблемами сталкиваются при рециклинге шлаков, содержащих алюминий. В зависимости от своего происхожде-

ния шлаки могут иметь различный химический состав, в который входят алюминий, его оксиды, а также другие элементы и солевые соединения. Они представляют собой большую опасность для окружающей среды, так как при контакте с водой в атмосферу выделяются экологически вредные вещества [31, 57, 58]. Значительная часть алюминиевых шлаков подвергается захоронению на специализированных полигонах, где могут происходить их перемешивание, а также контакт с окружающей средой. Анализ состава таких шлаков показывает, что в них может содержаться до 20 % Al. Кроме металлического алюминия в состав шлаков входят его оксиды, карбиды, шпинель и другие соединения различных металлов [57, 59, 60], образующие так называемую водонерастворимую составляющую. Указанные компоненты шлаков представляют интерес после рециклирования для повторного использования в различных отраслях промышленности [61].

Предложена практическая схема рециклирования Al-содержащих шлаков для выделения водонерастворимого компонента с целью его дальнейшего использования в качестве вторичного огнеупорного обсыпочно-го материала при изготовлении огнеупорных керамических форм для литья по выплавляемым моделям [62]. Установлено, что использование вторичного огнеупорного обсыпочно-го материала оказывает положительное влияние на чистоту поверхности алюминиевых опытных отливок. Кроме того, его применение способствует повышению прочности огнеупорных керамических форм в 9 раз по сравнению с формой из кварцевого песка, а также увеличению газопроницаемости на 15 и 33 % по сравнению с формами из электрокорунда и кварцевого песка соответственно.

Таким образом, следует отметить, что основные исследования направлены на поиск новых решений в технологиях переплава отходов, разработку составов более эффективных реагентов для очистки расплавов от растворимых и нерастворимых неметаллических включений, совершенство плавильного оборудования и т.д. Однако при решении вопросов получения качественных «вторичных» сплавов практически не рассматривается управление структурообразованием алюминиевых сплавов на стадии их получения из рециклируемых материалов. Тем не менее, дополнительным ресурсом повышения качества вторичных алюминиевых

сплавов являются селективный выбор рециклируемых отходов и целенаправленное воздействие на структурные элементы сплавов в жидком и кристаллизующемся состояниях. Данный подход основан на природном свойстве большинства известных промышленных металлов и сплавов – явлении структурной наследственности (ЯСН) [23, 30, 31, 63].

1.3 Управление структурой и свойствами алюминиевых сплавов на основе явления структурной наследственности

Приоритет в теоретическом обосновании и практическом использовании ЯСН принадлежит Самарской школе литейщиков (работы В.И. Никитина, К.В. Никитина, И.Ю. Тимошкина и др.) [23, 30, 63].

В работе [23] были представлены основные закономерности явления структурной наследственности, на основании которых убедительно доказывается длительность сохранения структурной информации во взаимосвязанной системе «шихта-расплав-литое изделие», обосновывается практическая возможность управления структурной информацией с целью формирования, закрепления и трансляции положительных структурных признаков от шихты (через жидкое состояние) к литому изделию.

Рассмотрены аспекты широкого проявления ЯСН в литейно-металлургических технологиях и процессах для сплавов различных систем [64]. Показано, что использование основных положений ЯСН на практике обоснованно получило название - «Технологии генной инженерии в сплавах» (ТГИ) [65-70].

С целью подавления отрицательной структурной информации и закладки положительных наследуемых структурных характеристик показана эффективность обработки расплавов систем Al-Si, Al-Si-Cu, Al-Mg импульсными магнитными [71-73] и электромагнитными акустическими полями [74].

При использовании ломов и отходов в составе шихты для приготовления алюминиевых сплавов различного назначения целесообразно применять ком-

плексные подходы, базирующиеся на основных закономерностях структурной наследственности.

Так, для приготовления легирующих микрокристаллических лигатур Al-Si необходимо использовать отходы кремния пылевидных фракций, приготовление лигатурного расплава осуществлять по низкотемпературной технологии (активировать эффект контактного плавления), а перед разливкой обрабатывать лигатурный расплав импульсными магнитными полями или осуществлять кристаллизацию с высокими скоростями охлаждения [75-77]. Целесообразность физических воздействий на расплав в сочетании с кристаллизационным способом обработки обоснована для производства микрокристаллических легирующих лигатур Al-Cu и Al-Fe с использованием электротехнических отходов алюминия, меди и железа [30, 78]. Эффективность указанного подхода показана на примере получения модифицирующих микрокристаллических лигатур Al-Ti, Al-Zr, Al-Sc [67, 79-82].

Известно, что высокое модифицирующее воздействие на структуру оказывают микрокристаллические и комплексные модифицирующие переплавы, которые можно получать с использованием возврата собственного производства, обеспечивая их модифицирующую способность за счет кристаллизационных способов обработки [6, 23, 30]. На основании результатов многочисленных экспериментов убедительно доказано, что модифицирующий эффект микрокристаллических переплавов сопоставим или превосходит модифицирующие лигатуры Al-Ti, Al-Ti-B при модифицировании высоколегированных силуминов.

О положительном опыте использования отдельных элементов ТГИ при использовании рециклируемых отходов свидетельствуют результаты исследований на примере получения припойного сплава системы Al-Cu-Si [83-86]. Вовлечение в состав шихты электротехнических отходов алюминия и меди, а также физические воздействия на расплав способствовали улучшению технологических свойств и структуры припойного сплава.

Рассматривая часть алюмосодержащих отходов, попадающих под номенклатуру «старый» лом, можно выделить группу деформированных отходов, которые содержат в себе положительную структурную информацию. К таким отходам

можно отнести баночные отходы, обрезь листов и лент деформируемых алюминиевых сплавов, электротехнические отходы алюминия и меди в виде проводов, шин и т.д. Использование перечисленных видов отходов с позиции ЯСН, с условием их обязательной подготовки к переплаву, можно получать качественные марочные сплавы, не уступающие по свойствам сплавам, получаемых из первичных шихтовых материалов. Показана эффективность применения баночных отходов для приготовления силуминов [87]. Установлено положительное влияние деформированных отходов в виде листов на структуру и свойства алюминиево-литиевого сплава марки 1420 [88] и на структуру силуминов [89].

Большое внимание структуре и свойствам «вторичных» алюминиевых сплавов уделяется в работах В.Б. Деева [31, 90, 91], в которых делается упор на физические способы обработки расплавов.

Важность применения основных закономерностей структурной наследственности на практике при получении сплавов на основе алюминия и цинка подчеркивается в работах А.И. Батышева и К.А. Батышева [92-97].

Эффективность управления структурообразованием алюминиевых сплавов с позиции явления структурной наследственности отмечено в работах хабаровской школы литейщиков (Ри Хосен, Э.Х. Ри) [98-99].

1.4 Цели и задачи исследования

Увеличение доли вовлекаемых рециклируемых металлических материалов для производства качественных «вторичных» сплавов на основе алюминия во многом сдерживается большим разнообразием образующихся ломов и отходов, что, в свою очередь, обусловлено широким применением алюминия и его сплавов в различных отраслях промышленности.

Специфику вносит многофакторность процессов литейного производства в системе «шихта-расплав-литое изделие».

Крупные предприятия по переработке алюминиевых ломов и отходов, в стремлении снизить свои производственные издержки, вводят специализацию по

переработке или какого-то одного, или группы близких по характеристикам отходов и производству из них ограниченной номенклатуры продуктов рециклирования.

Использование основных закономерностей явления структурной наследственности является эффективным инструментом для обеспечения качества «вторичных» алюминиевых сплавов. Однако, до сих пор отсутствуют систематизации отходов по их происхождению, критерии качества рециклируемых отходов с позиции ЯСН, обоснованные продукты рециклинга, которые можно эффективно вовлекать в процессы повторного использования.

На основании проведенного литературного обзора поставлена следующая **основная цель**: разработка комплекса технологических решений, направленных на производство литых изделий различного назначения из алюминиевых сплавов, получаемых с использованием металлических отходов.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи**:

1. Исследовать качество алюминиевых отходов в виде стружки и баночных ломов.
2. Разработать критерии качества исследованных алюминиевых отходов.
3. Разработать технологические этапы синтезирования алюминиевых сплавов из исследованных отходов.
4. Исследовать структуру и свойства синтезированных сплавов систем Al-Si, Al-Mg и Al-Cu-Si.
5. Разработать технологический процесс получения литой продукции и провести опытно-промышленные испытания.

2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Общая методика исследования. Объект и предметы исследования

Для решения поставленных задач и достижения цели работы была разработана общая схема исследований, которая позволила обеспечить преемственность и развитие ранее выполненных исследований, оценить наследственное влияние рециклируемых ломов и отходов в системе «твердое-жидкое-твердое», определить наиболее рациональные технологические решения для получения качественных литых изделий (рис. 2.1).

Объектом исследования являлись металлоотходы на основе алюминия различной природы и вида, *предметом исследования* служили различные виды литой продукции, получаемые на основе металлоотходов (рис. 2.2).

Основные характеристики металлоотходов, которые были задействованы в исследовании, представлены в таблице 2.1.

В таблице 2.2 представлены химические составы сплавов, получаемых в процессе исследования.



I – исследовательский этап; II – технологический этап

Рисунок 2.1 - Укрупненная схема диссертационного исследования



Рисунок 2.2 – Объект и предметы исследования

Таблица 2.1 – Основные характеристики металлоотходов

№ п/п	Марка сплава	Вид*	ГОСТ 54564-2011			
			Группа	Характеристика группы	Показатель	Норма**
1	А5-А85	Провода, сечка проводов, шины	А2	Лом нелегированного алюминия: электротехнические изделия	Содержание металла по массе, %, не менее	97
					Засоренность безвредными примесями по массе, %, не более	3
					В т.ч. железом, %, не более	2
2	АМг5 АМг6	Литые отходы в виде элементов ЛПС	А8	Отходы алюминиевого проката и литья с высоким содержанием магния	Содержание металла по массе, %, не менее	98
					Засоренность безвредными примесями по массе, %, не более	2
					В т.ч. железом, %, не более	Н/д
3	АМг5 АМг6	Деформированные отходы в виде пластин, лент	А9	Лом алюминиевого проката и литья с высоким содержанием магния	Содержание металла по массе, %, не менее	97
					Засоренность безвредными примесями по массе, %, не более	3
					В т.ч. железом, %, не более	2
4	АК9ч	Литые кокильные отходы в виде элементов ЛПС	А12	Отходы алюминиевого литья с низким содержанием Zn, Mg, Cu	Содержание металла по массе, %, не менее	98
					Засоренность безвредными примесями по массе, %, не более	2
					Засоренность железом	Н/д
5	Сплавы Al-Si	Стружка	А21	Чистая стружка алюминиевая сыпучая сортированная по группам сплавов Al-Si литейных или деформируемых	Металлургический выход по массе, %, не менее	90
					Засоренность безвредными примесями по массе, %, не более	10
					Засоренность железом, % не более	0,1
6	АМг6	Стружка вьюнообразная	А23	Стружка алюминиевая вьюнообразная по видам 1-10	Металлургический выход по массе, %, не менее	40
					Засоренность безвредными примесями по массе, %, не более	60
					Засоренность железом, % не более	2
7	А34	Банки из под напитков	А38	Дробленый лом алюминиевых банок из под напитков отмагниченный, без пластиковых банок, стекла и дерева. Марки: АМг2 (5251), АД31 (6063), АД0 (1050А) и др.	Содержание металла по массе, %, не менее	95
					Засоренность свинцом	н/д
					Засоренность железом по массе, %, не более	0,2
					Засоренность безвредными примесями, включая влагу, по массе, %, не более	5

*ЛПС- литниково-питающая система; **Н/д – не допускается

Таблица 2.2 – Химические составы сплавов

№ п/п	Марка сплава	Стандарт	Содержание элементов, %						
			Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Fe	Прочие
1	АК7	ГОСТ 1583-93	6,0-8,0	< 1,5	0,20-0,55	0,2-0,6	< 0,1	< 1,0	< 3,8
2	АК7ч		6,0-8,0	< 0,2	0,25-0,45	< 0,5	< 0,15	< 0,5	< 1,0
3	АК9ч		8,0-10,5	< 0,3	0,20-0,35	0,2-0,5	Ti+Zr < 0,12	< 0,5	< 1,5
4	АК12		10,0-13,0	< 0,6	< 0,1	0,01-0,5	< 0,1	< 0,7	< 2,1
5	АК6М2		5,5-6,5	1,8-2,3	0,35-0,50	< 0,1	0,1-0,2	< 0,5	< 0,7
6	АМгбл		< 0,2	< 0,15	6,0-7,0	< 0,1	0,05-0,15 Zr 0,05-0,20 Be 0,02-0,10	< 0,2	< 0,25
7	АМг5	ГОСТ 4784-97	< 0,5	< 0,1	4,8-5,8	0,3-0,8	0,02-0,1	< 0,5	< 0,2
8	А34	ОСТ 4Г 0.033.200	5,5-6,5	27,0-29,0	-	-	-	-	Сумма < 0,8

Как видно из таблицы 2.2 в качестве предметов исследования в работе были задействованы литейные сплавы систем Al-Si, Al-Si-Cu, Al-Mg; деформируемый сплав системы Al-Mg, припойный сплав системы Al-Cu-Si.

2.2 Основные материалы, оборудование и методы исследования свойств материалов

Лабораторные эксперименты и опытно-промышленные испытания выполняли в Центре литейных технологий ФГБОУ ВПО СамГТУ.

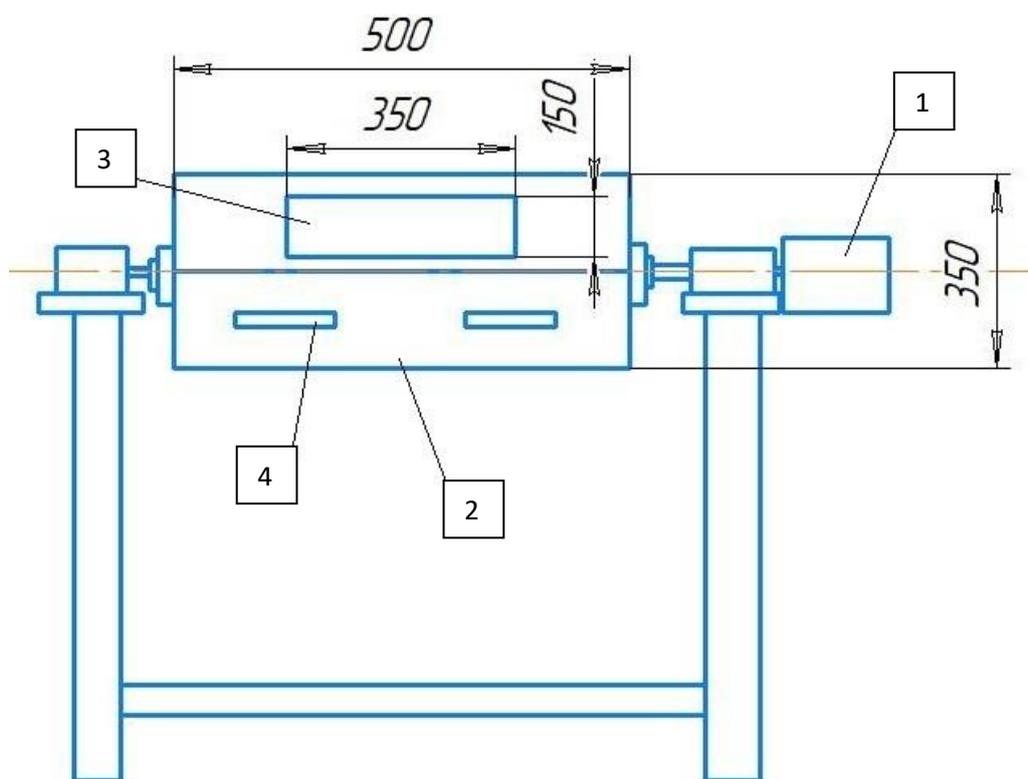
Кроме отходов, указанных в таблице 2.1, для приготовления марочных сплавов использовали следующие вспомогательные шихтовые материалы (табл. 2.3).

Таблица 2.3 – Вспомогательные шихтовые материалы для приготовления марочных сплавов

Категория	Марка	ГОСТ	Характеристика, вид	Назначение
Лом	M1	54564-2011	Группа М7, медная крошка из нелуженой меди	Подшихтовка меди в сплавах до требуемого содержания
Первичные металлы	Mг90 Mг95	804-93	Магний чушковый	Подшихтовка магния в сплавах до требуемого содержания
	A5-A85	11069-2001	Алюминий чушковый	В качестве основы сплавов
	Kp0 Kp00	2169-69	Кремний кристаллический	Подшихтовка кремния в сплавах до требуемого содержания
Лигатуры	AlSi20	53777-2010	Чушковая лигатура	Обеспечение требуемого содержания кремния в сплаве
	AlMn10		Чушковая лигатура	Обеспечение требуемого содержания марганца в сплаве
	AlBe3		Чушковая лигатура	Повышение плотности оксидной пленки на поверхности магниевых сплавов, модифицирование железосодержащей фазы
	AlSr10		Микрокристаллическая лигатура для модифицирования структуры, полученная кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе	Модифицирование кремниевой фазы
	AlTi5		Микрокристаллическая лигатура для модифицирования структуры, полученная кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе	Модифицирование дендритов алюминия

Применяемые отходы перед загрузкой в плавильную печь предварительно очищали и обезжировали. Баночные отходы после очистки подвергали прессованию в брикеты. Для магнитной сепарации стружки была разработана конструкция и изготовлено устройство для магнитной сепарации барабанного типа (рис. 2.3).

Отделение магнитных приделков осуществляется за счет неодимовых магнитов в виде прямоугольных пластин $15 \times 8 \times 2$ мм, расположенных на внешних стенках барабана. Сепарацию производили в следующем порядке. В барабан засыпали порцию стружки (2-3 кг) и включали двигатель, приводящий барабан во вращение посредством ременной передачи. Время вращения составляло 10-15 мин. После этого отключали двигатель, стружку ссыпали через загрузочное окно, отсоединяли магниты от барабана и удаляли магнитные приделки с помощью неодимового магнита, помещаемого в рабочую полость барабана.



1- двигатель; 2- барабан; 3- окно для загрузки стружки; 4- магнит

Рисунок 2.3 – Барабан для магнитной сепарации стружки

Лигатуры готовили в индукционной тигельной печи марки УИП-001 (РЭ-ЛТЭК, РФ) в графитовом тигле емкостью 10 кг по Al; сплавы - в тигельных печах сопротивления типа СНОЛ (графито-шамотные тигли емкостью 10 и 30 кг по Al).

Модельные плавки производили в тигельных печах сопротивления GRAFICARBO GF.1100 (компания GRAFICARBO, Италия) в графитовых тиглях емкостью 1 кг по Al. Контроль за температурой расплава осуществляли с помощью ХА-термопар, автоматического самопишущего потенциометра ПСР1-03 и многоканального цифрового видеорегистратора «Сенсорика Ш9329А».

Рафинирование силуминов производили комплексной флюсовой композицией (КФК) «Эвтектика» (ТУ-ВУ 100196035.018-2010). Расплавы системы Al-Mg рафинировали карналлитовым флюсом (ТУ 1714-470-05785388-2011). После обработки флюсами осуществляли выдержку в течение 20 мин, с зеркала расплава снимали шлак, перемешивали и производили заливку.

Модифицирование расплавов лигатурами производили при $t = 720 \div 730$ °С после флюсовой обработки, заливку осуществляли после выдержки в течение 15 мин.

Микрокристаллические лигатуры в виде лент толщиной 1,5-3,0 мм получали в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе (рис. 2.4), обеспечивая среднюю скорость охлаждения $v_{\text{охл}} \sim 10^3$ °С/с.

Химический состав сплавов определяли спектральным методом на спектроанализаторе ARL 3460 (АО «Аркони́к СМЗ», АО «Авиаагрегат»). Газосодержание сплавов определяли методом вакуум-нагрева с масс-спектрометрическим анализатором в динамическом режиме по ГОСТ 211321.1-81 (АО «Аркони́к СМЗ»). Механические испытания (предел прочности при растяжении σ_B и относительное удлинение δ) выполняли на «гагаринских» (ГОСТ 1497-84: тип 3 номер 8; тип 5 номер 5) и отдельно отлитых образцах в литом и термообработанном состояниях на разрывной машине Testometric модели FS 150 kN AX.



Рисунок 2.4 - Водоохлаждаемый валковый кристаллизатор

Металлографический анализ выполняли с помощью программно-аппаратного комплекса (ПАК) SIAMS-800 (ООО «СИАМС», г. Екатеринбург).

В твердом состоянии оценивали плотность методом гидростатического взвешивания и электропроводность (вихретоковый структуроскоп ВЭ-26НП, точность определения $\gamma \pm 0,1$ МСм/м).

Плотность расплавов определяли по методике, разработанной под руководством К.В. Никитина [100, 101]. Суть метода заключается в следующем: в кокиль (пробоотборник) из стали 45Х специальной конструкции [100], нагретый до температуры расплава, заливается определенная масса расплава; избыток расплава удаляется крышкой-отсекателем; после затвердевания производится точное взвешивание полученной пробы при комнатной температуре. Плотность расплава ρ_L определяется из отношения массы пробы к объему залитого в кокиль расплава:

$$\rho_L = \frac{M_{отл}}{V_L}, \quad (2.3)$$

где $M_{отл}$ - масса пробы при комнатной температуре, г; V_L - объем расплава, залитого в полость формы при температуре испытания, см³.

Для подтверждения воспроизводимости результатов, изложенных в [101], провели модельные эксперименты по определению плотности алюминия марки А995 в интервале температур 700-1000⁰С. Температура пробоотборника при испытаниях была постоянной – 350⁰С. Для предотвращения теплотерь пробоотборник перед нагревом помещали в керамический кожух. Из рисунка 2.5 видно, что разработанная методика характеризуется хорошей воспроизводимостью результатов по определению плотности алюминиевых расплавов.

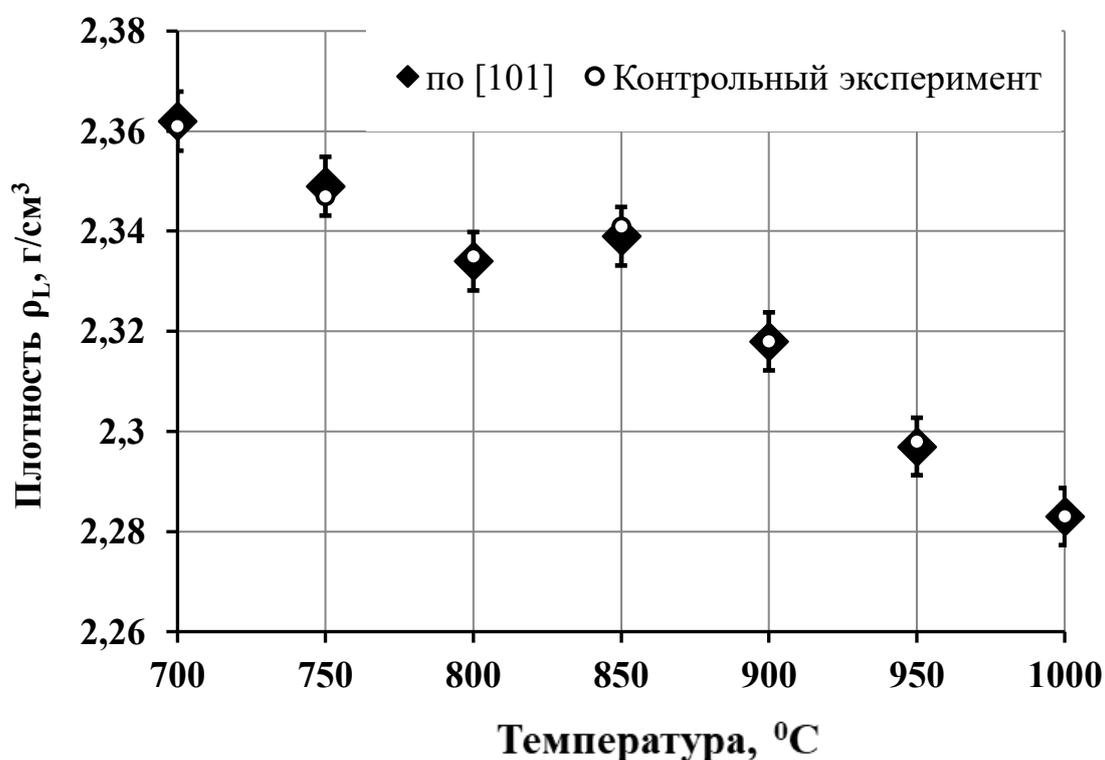


Рисунок 2.5 - Влияние температуры на плотность жидкого алюминия марки А995

С целью получения объективных результатов опыты повторяли 3-5 раз, а измерения свойств осуществляли на 5-10 образцах, получаемых в идентичных условиях.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований осуществлялась с использованием методов статистического анализа и программы Microsoft®Excel2007. В процессе статистической обработки результатов исследований определяли выборочную дисперсию S_x^2 и стандартное отклонение S_x , вычисляемые по формулам [102]:

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2, \quad (2.2)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}, \quad (2.3)$$

где n – количество значений определяемой величины x ; x_i – i значение величины x ; x_{cp} – среднее арифметическое.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЦИКЛИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ОТХОДОВ НА КАЧЕСТВО ПЕРЕ- ПЛАВОВ

3.1 Разработка критериев оценки качества низкосортных алюминиевых отходов

Ломы и отходы на основе алюминия характеризуются различной природой по происхождению (генезис) и видом в процессе образования. Для их классификации по группам в ГОСТ 54564-2011 [28] регламентируются следующие показатели качества: содержание металла, загрязненность примесями, загрязненность железом.

С точки зрения теории структурной наследственности для последующего эффективного использования рециклируемых ломов и отходов на практике необходимо учитывать дополнительные критерии, учитывающие их генезис и особенности структуры. С этой целью проводили исследование различных видов ломов и отходов [103, 104], укрупненные характеристики которых представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Виды ломов и отходов

№ п/п	Марка сплава (система)	Группа по ГОСТ 54564-2011	Вид, характеристика
1	3104 (Al-Mn-Mg)	A38	Лом банок из-под напитков
2	AK9ч (Al-Si-Mg)	A21	Сыпучая стружка, образующаяся при механической обработке отливок
4	Д16 (Al-Cu-Mg)	A23	Витая стружка, образующаяся при механической обработке деформированных полуфабрикатов
5	AMг6 (Al-Mg-Mn)	A23	
6	A7 (Al)	A2	Электротехнические ломы алюминия в виде проволоки диаметром 2-5 мм
7	M1 (Cu)	M7	Электротехнические ломы меди в виде проволоки диаметром 2-5 мм

На рисунке 3.1 представлен внешний вид исследуемых ломов и отходов.

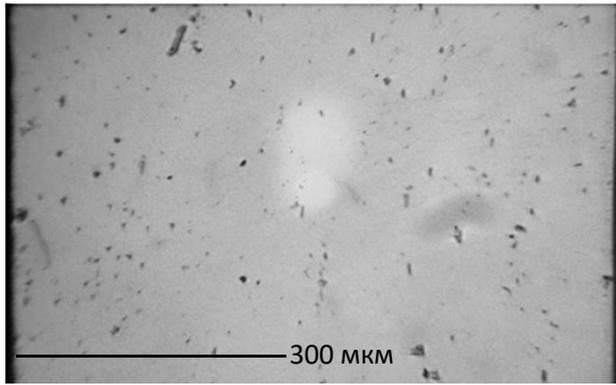


а – лом алюминиевых банок;

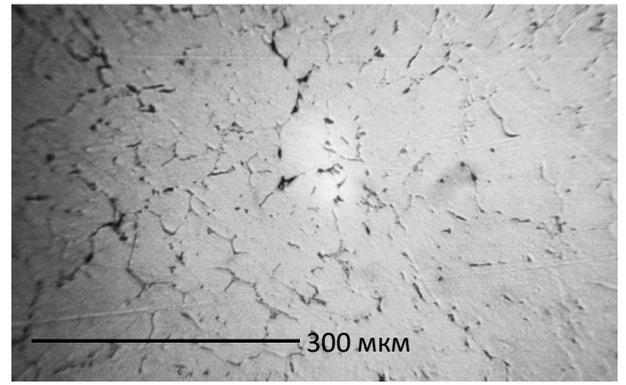
б, в, г – стружки сплавов АМг6, Д16, АК9ч, соответственно

Рисунок 3.1 – Внешний вид ломов и отходов

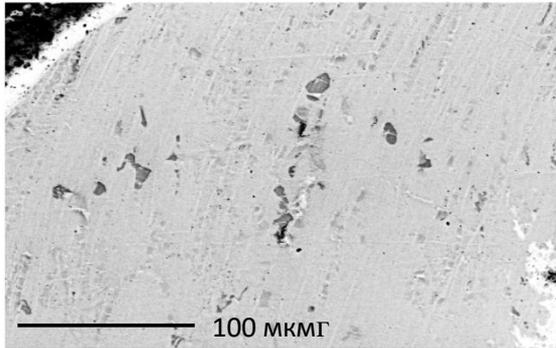
На первом этапе исследовали структуру ломов и отходов в исходном состоянии и после однократного переплава (рис. 3.2).



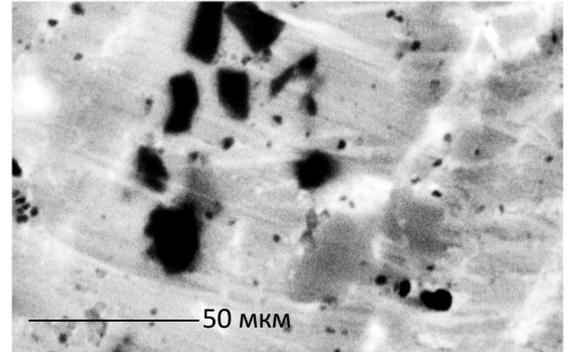
а



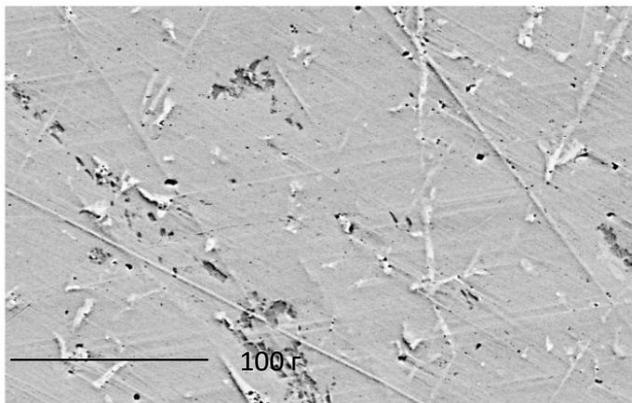
б



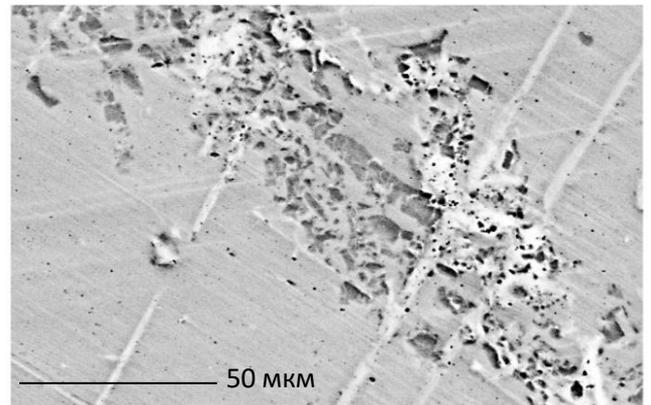
в



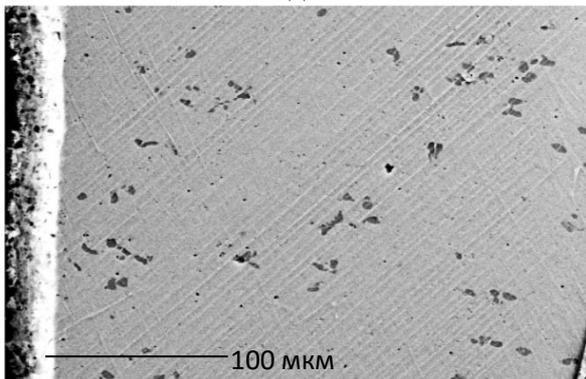
г



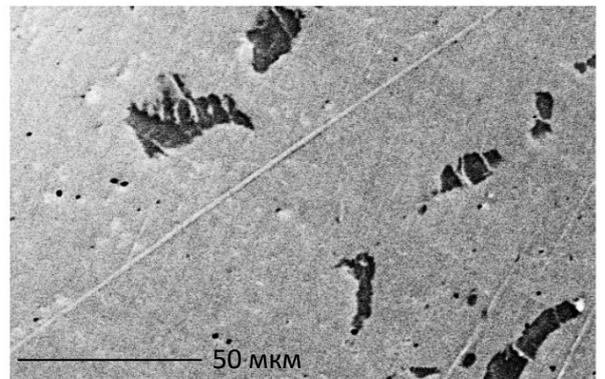
д



е



ж



з

а, в, д, ж – в исходном состоянии; б, г, е, з – после однократного переплава; а, б – баночные лома; в, г – стружка сплава АК9ч; д, е – стружка сплава АМгб; ж, з – стружка сплава Д16

Рисунок 3.2 - Микроструктура рециклируемых ломов и отходов

В микроструктуре баночных отходов до переплава (рис. 3.2, *а*) видно, что в алюминиевой матрице распределена β -фаза Al_3Mg_2 , средний размер которой составляет 1-3 мкм. После переплава (рис. 3.2, *б*) β -фаза Al_3Mg_2 сохраняет измельченное состояние и равномерно рассредоточена по границам дендритов $\alpha-Al$. В микроструктуре сыпучей стружки сплава АК9ч (рис. 3.2, *в, г*) размеры видимых включений эвтектического Si составляют 0,3-3 мкм. Структура стружки сильно деформирована и вытянута по направлению резания. В микроструктуре витой стружки сплава АМгб (рис. 3.2, *д, е*) наблюдается деформация β -фазы Al_3Mg_2 по направлению резания. Размеры β -фазы составляют 2-10 мкм. В микроструктуре витой стружки сплава Д16 (рис. 3.2, *ж, з*) также заметна деформация θ -фазы (Al_2Cu) по направлению резания, а её средние размеры составляют 3-8 мкм.

Микроструктура вышеперечисленных отходов характеризуется ярко выраженной структурной информацией заложенной на предыдущих технологических этапах.

Лента из сплава 3104 в процессе производства была получена посредством сильного деформационного воздействия при прокатке литых плоских слитков толщиной порядка 760 мм до ленты толщиной 0,10-0,15 мм, подвергаясь в процессе производства термической обработке.

Стружка сплава АК9ч образована в процессе механической обработки кокильных отливок, т.е. изначально имеет измельченную структуру, характерную литой корке, а в процессе механической обработки отливок подвергалась деформационному и термическому воздействию.

Стружки из сплавов Д16 и АМгб, образовались при обработке деформированных полуфабрикатов и, соответственно, в процессе своего происхождения материал стружки подвергался циклическим деформационным и термическим воздействиям.

Электротехнические лома алюминия и меди в процессе своего генезиса также испытывали комплекс деформационно-термических воздействий.

Соответственно, с позиции ЯСН все выше перечисленные лома и отходы можно классифицировать, как специально-обработанные шихтовые материалы, обладающие положительной структурной информацией [23].

Для качественной и количественной характеристики исследуемых ломов и отходов разрабатывали ряд дополнительных критериев, учитывающих засоренность отходов инородными материалами, наличие следов лакового покрытия (для баночных отходов) и смазочно-охлаждающей жидкости (для опилок и стружки), а также площадь поверхности контакта с атмосферой.

Первым важным критерием является критерий чистоты ломов и отходов $k_{ч}$.

Баночный лом является наиболее сложным ломом по видам засора. Внутри банок могут присутствовать различные примеси в виде бумаги, полиэтилена, пищевых отходов. На внутренней и наружной поверхностях банки покрыты лаком. На первом этапе на основании случайной выборки из 300 банок определяли коэффициенты вероятного засора баночного лома посторонними примесями и потерю массы за счет выгорания лакокрасочного покрытия в процессе подготовки лома к переплаву. Данные для расчета представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Данные для расчета $k_{ч}$ для баночного лома

Масса банки, г	Масса засоров посторонними примесями, г	Средняя доля банок с засором, %	Масса банки после удаления лакокрасочного покрытия, г	Средняя потеря массы, %
13,0-13,8	14,16-18,83	5	12,36-13,08	4,5

Коэффициент вероятного засора баночных отходов $i_{б}$ был определен по формуле:

$$i_{б} = (p_i \times i_m)/100, \quad (3.1)$$

где p_i – доля (вероятность) банок с засором, %; i_m – средний засор алюминиевой банки, %.

Общую загрязненность баночных отходов I_B (%) определяли по формуле:

$$I_B = i_B + v_1, \quad (3.2)$$

где i_B – средний вероятный засор алюминиевых банок, %; v_1 – потери массы отходов банок после термической обработки, %.

Общую загрязненность I_C опилок и стружки определяли следующим образом: отходы взвешивали, промывали в мыльной теплой воде, проводили сушку и снова взвешивали, определяя степень загрязненности, как долю в (%).

Критерий чистоты баночных отходов, опилок и стружки $k_{ч}$ определяли по формуле:

$$k_{ч} = 1 - \frac{I}{100}, \quad (3.3)$$

где I – общая загрязненность определенного вида отходов (I_B – банок; I_C – опилок и стружки).

Зная общую загрязненность отходов (неметаллической части), максимальное извлечение металла (критерий M_{Me}) при переплаве можно определить по формуле:

$$M_{Me} = \frac{M_{П}}{M_{O}} \times k_{ч}, \quad (3.4)$$

где $M_{П}$ – масса полученного переплава (кг); M_{O} – масса рециклированных отходов (кг); $k_{ч}$ – критерий чистоты отходов.

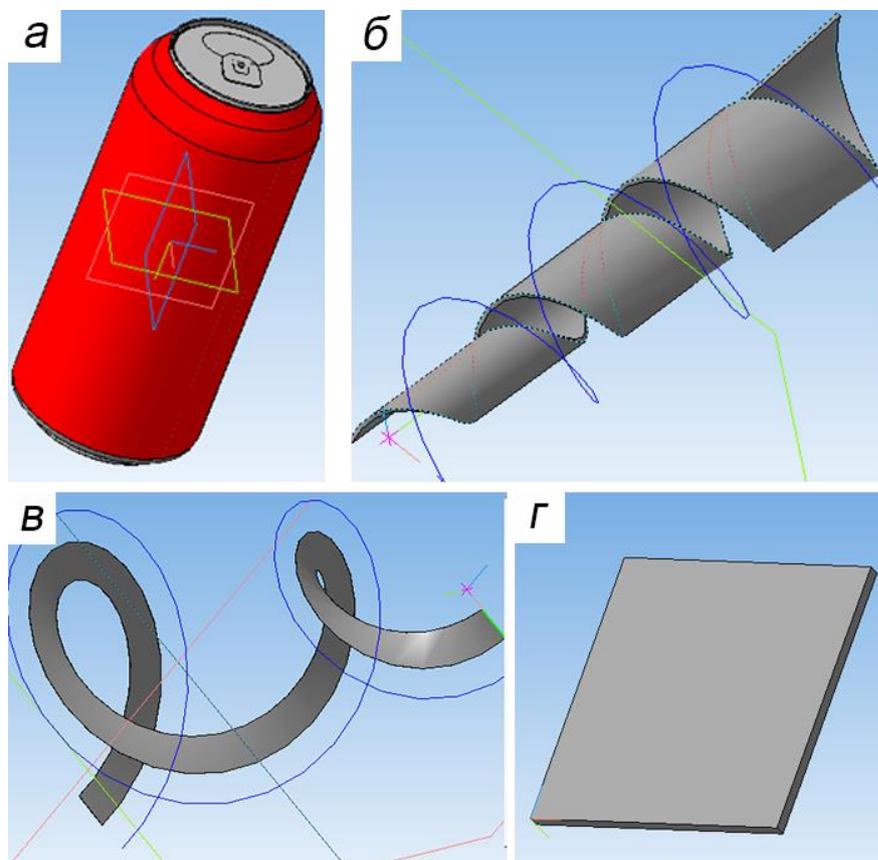
Исходя из 3.1-3.4, выход годного при рециклинге алюминиевых отходов не может быть выше значения $k_{ч}$ для определенного вида отходов.

Чем выше площадь поверхности шихты и меньше ее объем, тем быстрее происходят процессы плавления и окисления. По численному отношению площади поверхности к объему шихты можно косвенно судить о скорости плавления и окисления такой шихты при переплаве. Дополнительной качественной характеристикой рециклирования является критерий контакта отходов с атмосферой k_A (мм⁻¹):

$$k_A = S/V, \quad (3.5)$$

где S – площадь поверхности отхода, мм²; V – объем отхода в некомпактированном виде, мм³.

Значения S и V для каждого вида исследуемых отходов, определив их толщину, габаритные размеры и геометрию, рассчитывали с применением программы КОМПАС-3D LT. Трехмерные модели отходов представлены на рис. 3.3.



а – банка; б, в – витая стружка сплавов АМг6 и Д16, соответственно; г – сыпучая стружка сплава АК9ч

Рисунок 3.3 - Трехмерные модели исследуемых ломов и отходов

Для определения критерия M_{Me} провели отдельный переплав каждого вида материалов. Сплавы готовили в печи сопротивления в графито-шамотной тигле. Все материалы предварительно подготавливали к плавке: сыпучую (АК9ч) и витую (Д16, АМг6) стружку подвергали магнитной сепарации и просушиванию от остатков смазочно-охлаждающей жидкости в сушильном шкафу при температуре 100-150⁰С. Витую стружку и баночный лом перед загрузкой в тигель подвергали прессованию, получая брикеты. Предварительно подготовленные лома и отходы загружали в расплав электротехнических ломов алюминия при температуре 740-

750⁰С. Плавку вели под слоем ФКК «Эвтектика». При определении критерия M_{Me} массу электротехнических ломов и ФКК не учитывали.

На основании вышеприведенных качественных критериев выполнили ранжирование каждого вида отходов: чем выше балл, тем более высокую качественную характеристику имеет определенный вид отхода (табл. 3.3).

Таблица 3.3 - Критерии качества рециклируемых алюминиевых отходов

Вид отхода	Средний размер вторичных фаз, мкм	$k_{ч}$	k_{A} , мм ⁻¹	M_{Me}	Балл
Баночный лом 3104	2,0	0,91	19,3	0,86	4-5
Сыпучая стружка АК9ч	1,65	0,96	10-15	0,94	9
Стружка АМг6	6,0	0,99	17-20	0,92	6
Стружка Д16	5,5	0,94	100-150	0,92	6

По совокупности дополнительных критериев наиболее качественными отходами можно считать опилки сплава АК9ч: средний размер вторичных фаз 0,3-3 мкм, $k_{ч} = 0,955$, $k_{A} = 10-15$ мм⁻¹, $M_{Me} = 0,94$ (табл. 3.3). Равному количеству баллов у стружки сплавов АМг6 и Д16 способствовало наличие более высоких показателей по нескольким критериям. Для стружки Д16 критерий k_{A} оказался в 10 раз больше, чем у других отходов из-за малой толщины стружки (0,02 мм). Критерий M_{Me} для обоих видов стружки составил 0,92. Критерий $k_{ч}$ для стружки сплава АМг6 – 0,99. Наименее качественным шихтовым материалом по совокупности критериев являются баночные отходы: $k_{ч} = 0,91$, $k_{A} = 19,3$ мм⁻¹, $M_{Me} = 0,86$.

3.2 Влияние параметров прямого переплава отходов на структуру и свойства предварительных сплавов системы Al-Si

В данной серии экспериментов исследовали влияние параметров прямого переплава на металлургический выход годного (МВГ) и структуру предварительного сплава АК9ч [105]. Под прямым переплавом понимали приготовление пред-

варительного сплава только с использованием стружки (без легирующих и модифицирующих добавок).

Для исследований были выбраны следующие материалы (рис. 3.4):

1. Мелкая (сыпучая) стружка сплава АК9ч после обработки кокильных отливок (рис. 3.4, а).
2. Крупная (хлопьевидная) стружка сплава АК9ч после обработки отливок, полученных литьем в ПГФ (рис. 3.4, б).
3. Брикетированная (спрессованная) стружка сплава АК9ч в соотношении 50/50 стружек по п.п. 1 и 2 (рис. 3.4, в).



а – сыпучая мелкая стружка; б – хлопьевидная крупная стружка;
в – брикетированная стружка

Рисунок 3.4 – Внешний вид стружки из сплава АК9ч

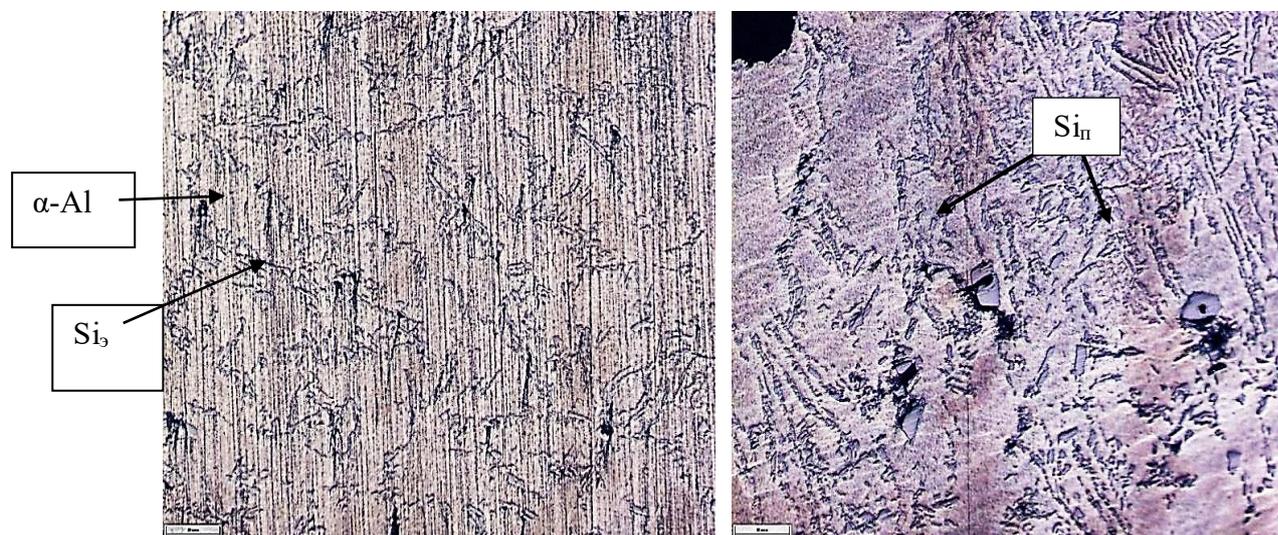
Стружка проходила предварительную сушку при температуре 250°C в течение 40-60 мин. Содержание влаги и СОЖ во всех видах стружки не превышало 0,5 %.

Характеристика использованных материалов представлена в таблице 3.4. Видно, что с увеличением размера стружка увеличивается ее насыпная плотность. Плотность брикетов составляет 96% от теоретической плотности сплава АК9ч.

Таблица 3.4 – Характеристика стружки АК9ч

№ п/п	Вид стружки	Происхождение	Размер, мм	Насыпная плотность/плотность брикетов, г/см ³
1	Мелкая, сыпучая	Механическая обработка кокильных отливок	7,0×4,0×0,1	0,34
2	Крупная, хлопьевидная	Механическая обработка ПГФ-отливок	35,0×15,0×1,7	0,60
3	Брикетированная	50%- мелкая сыпучая; 50% - крупная хлопьевидная	60,0×40,0×110,0	2,557

На рисунке 3.5 представлена микроструктура мелкой и крупной стружек в исходном состоянии. Видно, что стружка, образующаяся в процессе механической обработки кокильных отливок, характеризуется измельченными кристаллами эвтектического кремния и дендритами α -Al. В микроструктуре крупной стружки, образовавшейся в процессе механической обработки ПГФ-отливок, присутствуют единичные кристаллы первичного кремния $Si_{п}$.



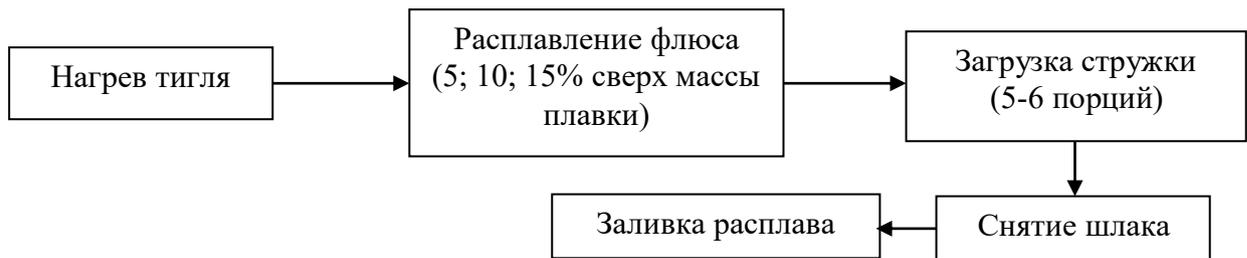
а – мелкая стружка, $\times 400$; б – крупная стружка, $\times 200$

Рисунок 3.5– Микроструктура стружек сплава АК9ч

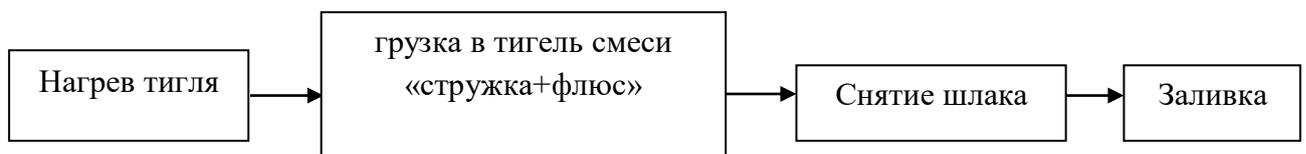
Далее выполняли отдельные переплавы небрикетированных стружек по 4-м технологическим схемам (рис. 3.6).



а



б



в



г

а - переплав на «болоте»; б - переплав в расплавленном флюсе; в - переплав смеси «стружка+флюс»; г - комплексная переплавка на «болоте» смеси «стружка+флюс»

Рисунок 3.6 – Технологические схемы переплава стружки АК9ч

При переплаве на «болоте» (рис. 3.6, а) варьировали его процентным содержанием (30, 40 и 50% от массы плавки). Для получения «болота» в нагретый тигель загружали предварительный сплав АК9ч от предыдущей плавки. После образования «болота» загружали стружку (4-6 порциями), замешивая ее в расплав. Продолжительность загрузки всей навески - 10-20 мин. После расплавления стружки и нагрева расплава до 720-730 °С проводили рафинирование КФК «Эвтектика» в количестве 1,5-2,0% от массы плавки, выдерживали в течение 20 мин, снимали шлак и производили заливку.

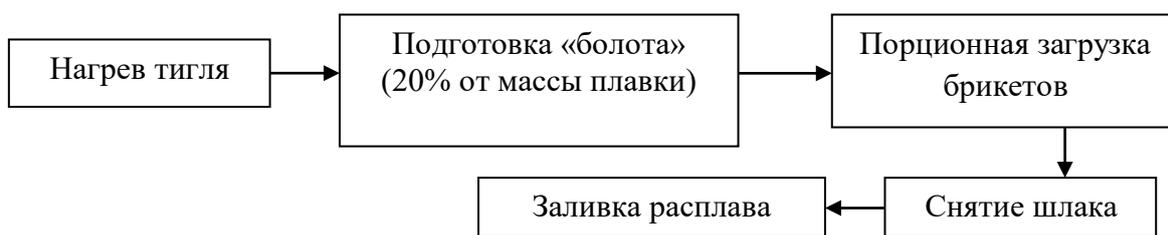
В процессе переплава стружки в расплавленной КФК «Эвтектика» (рис. 3.6, б) варьировали процентным содержанием флюсовой композиции (5, 10 и 15% сверх массы плавки). КФК предварительно расплавляли в тигле в требуемом количестве. Первую порцию стружки замешивали в расплавленный флюс, после расплавления первой порции стружки, последующие вводили порционно по мере расплавления. Расплав КФК, при этом, находился над зеркалом металлического расплава. Дополнительное рафинирование расплава перед заливкой не проводили.

Технологическая схема переплава смеси «стружка + флюс» (рис. 3.6, в) заключалась в предварительном смешивании стружки и ФКК (в количестве 20% сверх массы плавки). Первую порцию смеси загружали в пустой нагретый тигель, вторую - после расплавления первой. Общее время расплавления стружки и нагрева расплава до температуры заливки (720 °С) составило 30 мин. Рафинирование расплава перед заливкой не проводили.

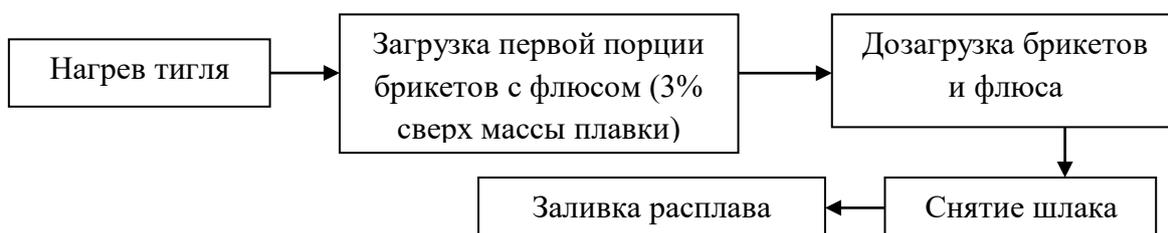
Особенность комплексной переплавки (рис. 3.6, г) заключалась в том, что в тигле готовили «болото», в которое затем порционно вводили смесь «стружка+флюс». Дополнительное рафинирование расплава перед заливкой не осуществляли.

Переплав брикетированной стружки проводили по 2-м технологическим схемам (рис. 3.7). По первой технологической схеме (рис. 3.7, а) в тигле готовили «болото», в которое затем порционно вводили брикеты, рафинирование расплава перед заливкой не осуществляли. По второй технологической схеме (рис. 3.7, б) в тигель загружали порцию брикетов, засыпали их слоем флюса и производили

нагрев шихты до 720 °С. По мере расплавления предыдущей порции брикетов производили дозагрузку новых порций.



а



б

а – переплав на «болоте»; б – переплав «брикет+флюс»

Рисунок 3.7 – Технологические схемы переплава брикетированной стружки

Металлургический выход годного (МВГ) определяли по формуле:

$$\text{МВГ} = \frac{M_{\text{отливок}}}{M_{\text{шихты}}} * 100\% \quad (3.6)$$

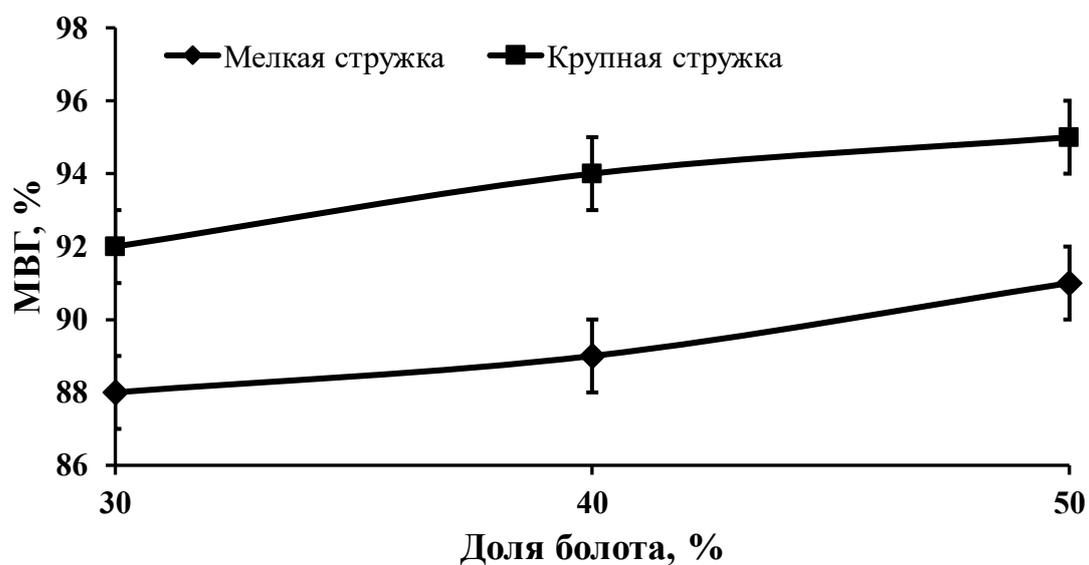
где $M_{\text{отливок}}$ – масса отливок после плавки, кг;

$M_{\text{шихты}}$ – масса шихты, загруженной в печь, кг

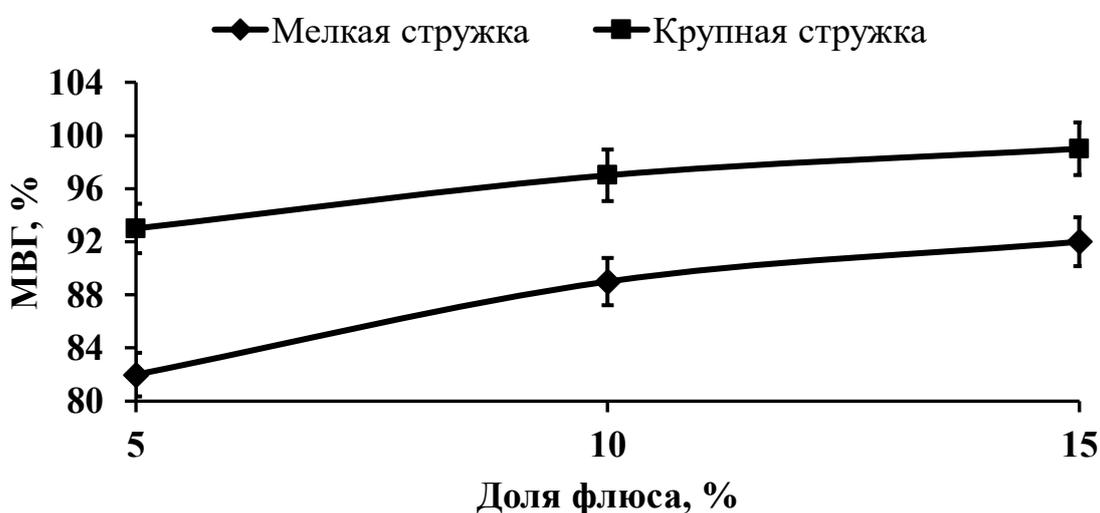
В таблице 3.5 приведены результаты переплава стружек по опробованным технологическим схемам. На рисунке 3.8 представлен анализ полученных результатов для технологических схем переплава сыпучей стружки на «болоте» и в жидкой КФК.

Таблица 3.5 – Влияние технологической схемы переплава стружек на МВГ

№ п/п	Технологическая схема (ТС) по рис. 3.5, 3.6	Описание ТС	МВГ, %
Мелкая стружка			
1	3.5, а	Переплав на «болоте» с порционным замешиванием стружки Доля «болота» от массы плавки, %	
		30	88
		40	89
		50	91
2	3.5, б	Переплав в жидкой КФК с порционной дозагрузкой стружки Доля жидкой КФК сверх массы плавки, %	
		5	82
		10	89
		15	92
3	3.5, в	Переплав смеси «стружка+флюс» с порционной дозагрузкой	91
4	3.5, г	Переплав на «болоте» с загрузкой смеси «стружка+флюс»	92
Крупная стружка			
5	3.5, а	Переплав на «болоте» с порционным замешиванием стружки Доля «болота» от массы плавки, %	
		30	92
		40	94
		50	95
6	3.5, б	Переплав в жидкой КФК с порционной дозагрузкой стружки Доля жидкой КФК сверх массы плавки, %	
		5	93
		10	97
		15	99
7	3.5, в	Переплав смеси «стружка+флюс» с порционной дозагрузкой	96
8	3.5, г	Переплав на «болоте» с загрузкой смеси «стружка+флюс»	97
Брикетированная стружка			
9	3.6, а	Переплав на «болоте»	96
10	3.6, б	Переплав «брикет+флюс»	94



а



б

а – переплав на «болоте»; б – переплав в жидкой КФК

Рисунок 3.8 – Влияние технологической схемы переплава сыпучей стружки АК9ч

Анализ представленных результатов показывает, что увеличение доли «болота» или жидкой КФК способствует увеличению МВГ. Это связано с тем, что быстрое замешивание стружки в расплав или погружение ее в ванну расплавленного флюса сокращает время ее контакта с атмосферой печи и, как следствие, потери металла на угар. Кроме того, видна четкая зависимость МВГ от размера стружки. Значения МВГ при обеих технологических схемах переплава выше для крупной стружки. В данном случае влияние оказывает размерный фактор струж-

ки, который был определен, как критерий контакта отходов с атмосферой k_A (3.5). Мелкая стружка характеризуется более развитой суммарной поверхностью, что предопределяет более высокие значения критерия k_A и повышенную окисляемость поверхности. Влияние критерия k_A прослеживается и при переплаве сыпучей стружки по технологическим схемам «стружка+флюс» (рис. 3.6, в) и «комплексный переплав» (рис. 3.6, г). При переплаве брикетированной стружки повышенный МВГ установлен при ведении плавки на «болоте» (96%) по сравнению с переплавом с использованием только КФК (94%).

Исследовали макроизлом предварительных сплавов АК9ч, полученных по наиболее эффективным технологическим схемам (рис. 3.9).



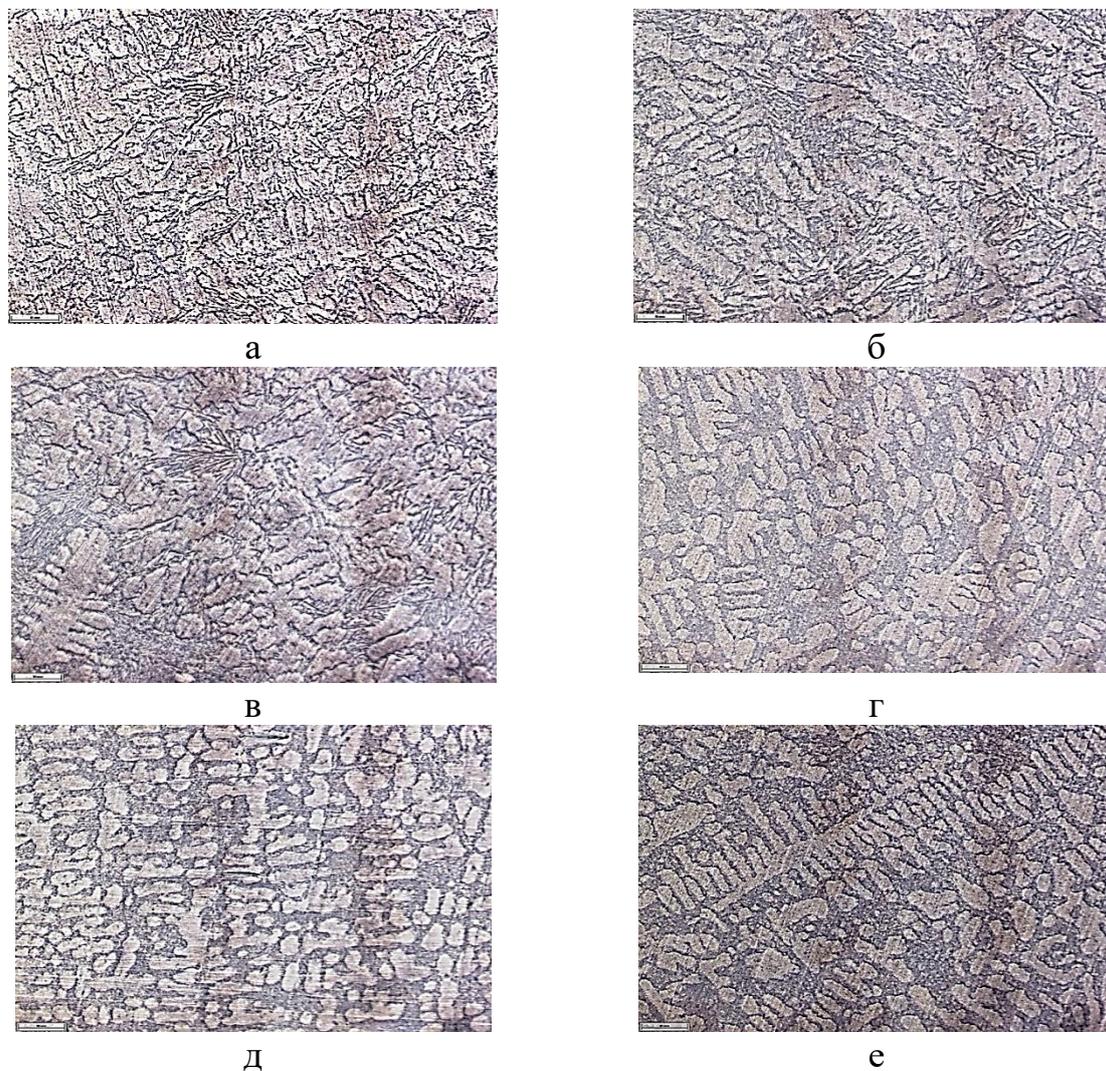
а, г – мелкая стружка; б, д – крупная стружка; в – брикетированная стружка; а-в – переплав на «болоте»; г, д – переплав в жидком флюсе

Рисунок 3.9 – Влияние технологической схемы переплава на макроизлом предварительных сплавов АК9ч ($\times 1$)

В структуре всех изломов отсутствуют шлаковые включения и газовые раковины. Наиболее плотными и однородными изломами характеризуются предва-

рительные сплавы, полученные при переплаве стружек в жидкой КФК (рис. 3.9, г, д).

На рисунке 3.10 показано влияние технологических схем переплава стружек на микроструктуру предварительных сплавов АК9ч.



а, г – мелкая стружка; б, д – крупная стружка; в, е – брикетированная стружка; а-в – переплав на «болоте»; г-е – переплав в жидком флюсе

Рисунок 3.10 – Влияние технологической схемы переплава на микроструктуру предварительных сплавов АК9ч ($\times 200$)

Анализ микроструктур показывает, что природа стружки оказывает существенное наследственное влияние на структуру предварительных сплавов. Сплавы, полученные из переплава мелкой (кокильная) стружки, характеризуются из-

мельченными дендритами α -Al и кристаллами эвтектического кремния Si₃ (рис. 3.10, а, г) по сравнению с переплавом крупной стружки, образованной при механической обработке ПГФ-отливок (рис. 3.10, б, д). Микроструктура предварительного сплава, полученного из переплавов брикетированной стружки, занимает среднее положение, т.к. брикетированию подвергалось по 50% мелкой и крупной стружек (рис. 3.10, в, е). Переплав в ванне расплавленной КФК оказывает дополнительной модифицирующее воздействие на структуру предварительных сплавов АК9ч (рис. 3.10, г-е).

Совокупный анализ опробованных технологических схем переплава различных видов стружки и качества получаемого предварительного сплава АК9ч позволил выявить их преимущества и недостатки.

Наибольший металлургический выход годного металла (92-99%) и модифицированная структура получена при переплаве стружки в расплавленном флюсе. Однако, существенным недостатком данной технологической схемы является повышенный расход солевых реагентов, повышенный расход электроэнергии, затрачиваемый на получение жидкой КФК, а также негативное влияние на человека и окружающую среду.

На основании вышеизложенного была опробована комплексная технологическая схема переплава стружки, базирующаяся на основных преимуществах опробованных схем (рис. 3.11).

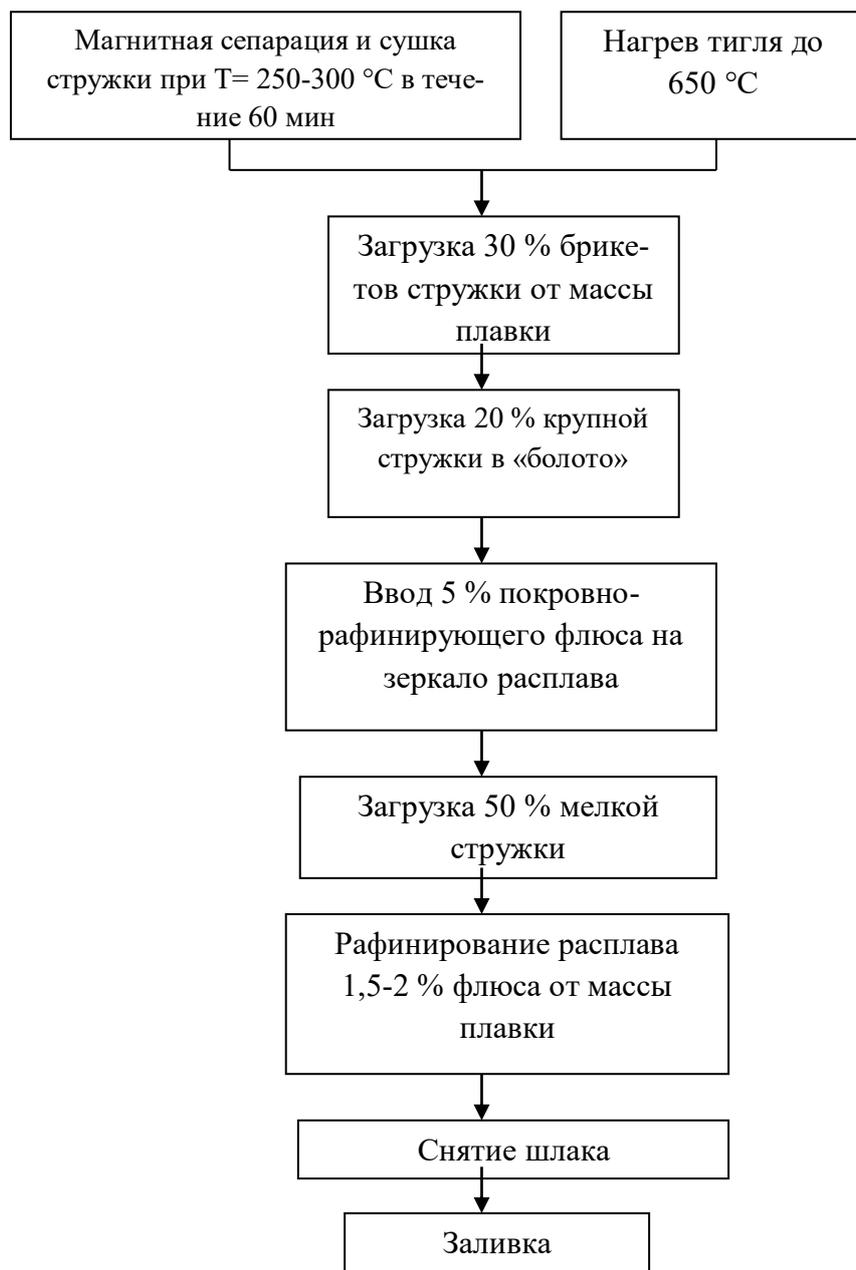


Рисунок 3.11 – Комплексная технологическая схема переплава стружки

По разработанной комплексной технологической схеме были проведены тестовые плавки в количестве 5 шт. Масса плавки составляла 10 кг. На первом этапе стружку отдельно по фракциям подвергали магнитной сепарации и сушке. Часть стружки брикетировали в соотношении 50%-мелкой стружки; 50%-крупной стружки. Тигель плавильной печи разогревали до 650-700 °С. Затем загружали брикеты стружки для формирования «болота». Время расплавления 25 мин. После образования «болота» загружали крупную стружку с интенсивным ее замешиванием в расплав. Загрузку крупной стружки осуществляли тремя порциями. Время

загрузки и расплавления 10 мин. Далее зеркало расплава покрывали ФКК ОДО «Эвтектика» в количестве 5% сверх массы плавки и производили загрузку мелкой стружки с интенсивным ее замешиванием в расплав. Загрузку мелкой стружки осуществляли 5-ю порциями по мере ее усвоения. Время загрузки и расплавления мелкой стружки - 25 мин. После расплавления всей стружки проводили рафинирование расплава покровно-рафинирующим флюсом в количестве 1,5% от массы плавки. Выдержка после рафинирования 10 минут, снятие шлака и заливка расплава в кокиль. Metallургический выход годного металла при комплексной технологической схеме переплава стружки составил 95-97%. На рисунке 3.12 представлены изломы и фрагменты микроструктуры предварительного сплава АК9ч.



а



б

а – макроизлом сплава; б – микроструктура сплава

Рисунок 3.12 – Структура предварительного сплава АК9ч

В изломах отсутствовали шлаковые включения и газовые поры. Микроструктура сплава – однородная, мелкозернистая. Химический состав промежуточного сплава АК9ч соответствует требованиям ГОСТ 1583-93 для марочного сплава АК9ч и представлен в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Химический состав предварительного сплава АК9ч

№ п/п	Сплав	Содержание элементов, %					
		Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Fe
1	Предварительный сплав АК9ч	8,7	0,26	0,22	0,4	0,11	0,41
3	АК9ч по ГОСТ 1583-93	8,0-10,5	< 0,3	0,20-0,35	0,2-0,5	Ti+Zr < 0,12	< 0,5

По результатам исследования разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-9 «Рециклирование сыпучей стружки литейных сплавов системы Al-Si» (Приложение А).

3.3 Влияние параметров прямого переплава отходов на структуру и свойства предварительных сплавов системы Al-Mg

Исследовали влияние технологических схем прямого переплава стружки АМгб, образовавшейся в процессе механической обработки деформированных полуфабрикатов.

Стружку предварительно подвергали магнитной сепарации и сушке.

Как было показано в п. 3.1, данная стружка характеризуется достаточно развитой поверхностью и высокими значениями критерия k_A , что может негативно сказываться на показатели МВГ при прямом переплаве.

С другой стороны, стружка в процессе своего образования унаследовала структуру деформированного полуфабриката и подверглась дополнительным деформационным и термическим воздействиям в процессе механической обработки резанием.

Основным легирующим элементом сплава АМгб является магний, который подвержен повышенным значениям угара в процессе переплава.

Вышеуказанные моменты были учтены при разработке технологической схемы прямого переплава стружки вьюнообразного вида (рис. 3.13).

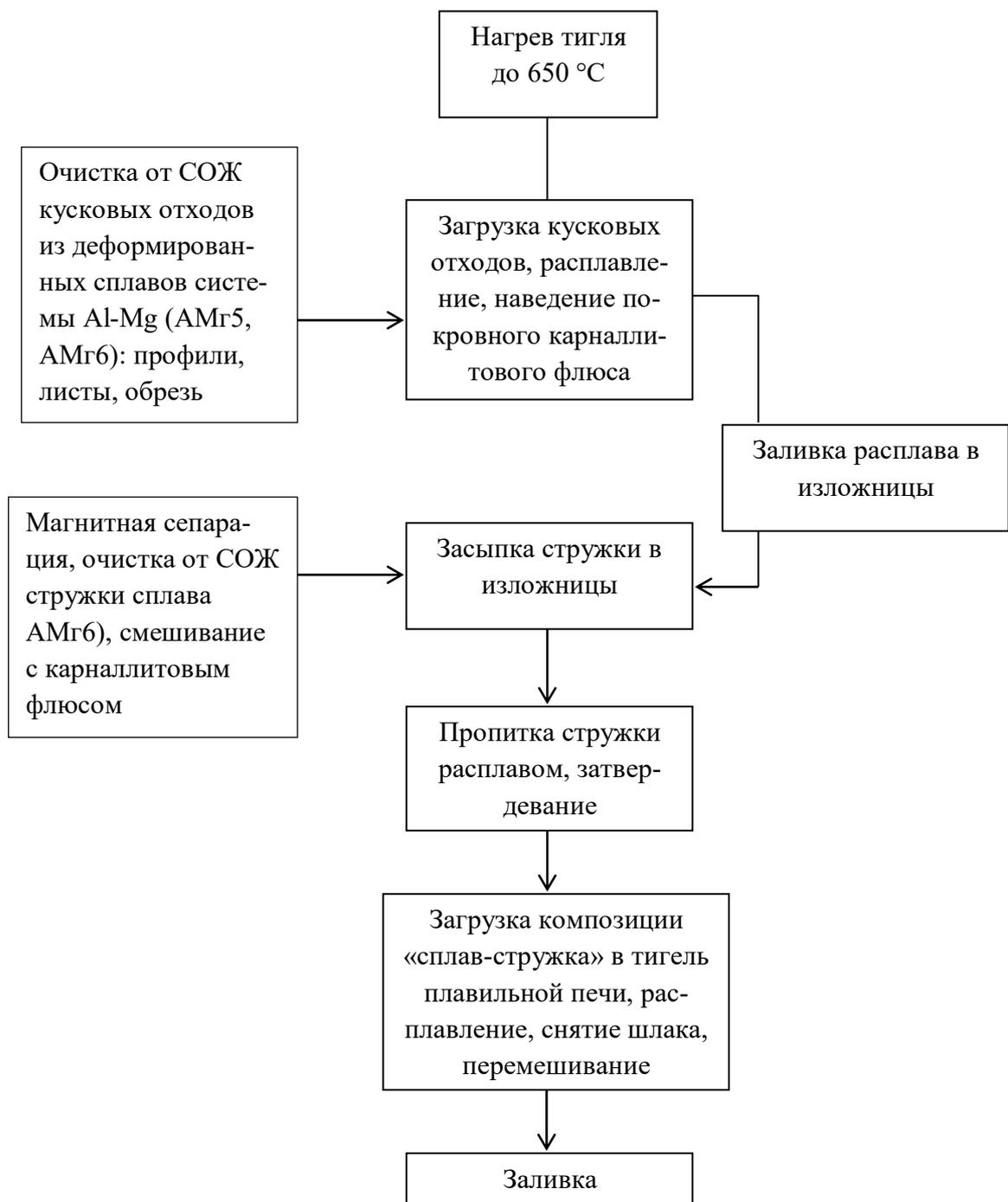


Рисунок 3.13 – Технологическая схема получения предварительного сплава системы Al-Mg

Особенности данной технологической схемы заключались в следующем. Кусковые отходы деформируемых сплавов системы Al-Mg (AMг5, AMг6) очищали от остатков СОЖ (средняя доля СОЖ составляла 0,5% по массе). Подготовленные кусковые отходы загружали в предварительно нагретый до 650 °С тигель плавильной печи. Расплавление осуществляли под слоем карналлитового флюса (5% сверх массы плавки). Предварительно подготовленную и горячую стружку раскладывали по изложницам, нагретым газовой горелкой до 100-150°С. Масса стружки, помещенной в изложницу, составляла 1,5-2 кг (15-20% от массы заливаемого в изложницу расплава). Заливку производили при температуре расплава 750-760°С. Расплав хорошо пропитывал стружку, обволакивая ее поверхность. Дымовыделение наблюдалось только в первый момент контакта расплава со стружкой, далее дымовыделение отсутствовало. Горение не наблюдалось.

Таким образом получали композицию «сплав-стружка» для дальнейшего переплава (рис. 3.14).

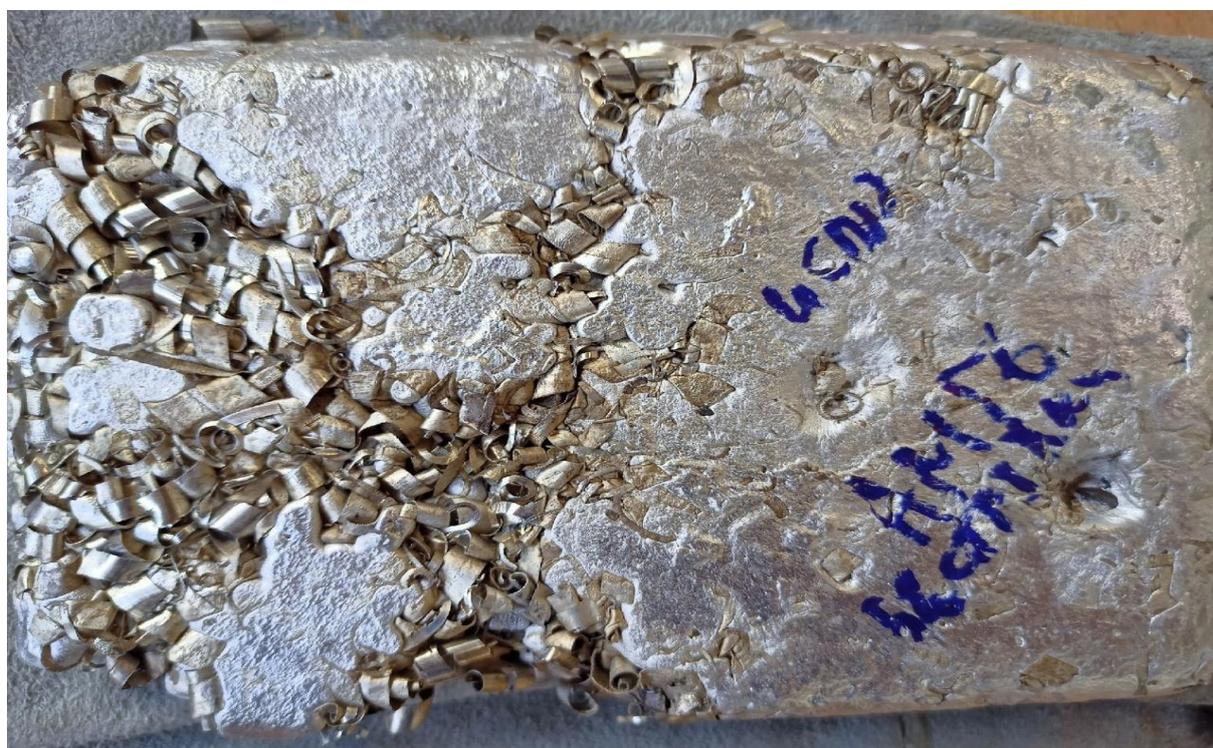


Рисунок 3.14 – Композиция «сплав-стружка» для получения предварительного сплава AMг6

Далее полученную композицию «сплав-стружка» загружали в горячий тигель плавильной печи и производили окончательное расплавление стружки под слоем карналлитового флюса (5% от массы плавки). Полученный предварительный сплав разливали по изложницам, получая шихтовые заготовки для приготовления рабочих сплавов системы Al-Mg.

Суммарный МВГ (кусковые отходы+стружка) по разработанной технологической схеме составил 93-95%.

В таблице 3.7 представлен химический состав предварительного сплава АМг6.

Таблица 3.7 - Химический состав предварительного сплава АМг6

№ п/п	Марка сплава	Стандарт	Содержание элементов, %					
			Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Fe
5	АМг6	Предварительный сплав	0,21	0,08	5,8	0,47	0,023	0,38
6	АМг6	ГОСТ 4784-97	< 0,4	< 0,1	5,8-6,8	0,5-0,8	Ti 0,02-0,10	< 0,4
7	АМг5		< 0,5	< 0,1	4,8-5,8	0,3-0,8	Be 0,0002-0,005	< 0,5

Анализ химического состава показывает, что из предварительного сплава можно приготовить деформируемые сплавы АМг6 и АМг5.

На рисунке 3.15 приведены фрагменты структур предварительного сплава АМг6.



а



б

а – излом предварительного сплава;

б – микроструктура предварительного сплава

Рисунок 3.15 – Структура предварительного сплава АМг6

Видно, что в структуре отсутствуют шлаковые включения, газовые раковины и пористость.

По результатам исследования разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-10 «Рециклирование вьюнообразной стружки деформируемых сплавов систем Al-Mg, Al-Cu» (Приложение Б).

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Разработаны дополнительные критерии качества дисперсных отходов на основе алюминия: баночного лома, сыпучей стружки литейных сплавов и вьюнообразной стружки деформируемых сплавов. Критерии учитывают общую загрязненность ломов и отходов (критерий чистоты $k_{\text{ч}}$), контакт поверхности отходов с атмосферой печи ($k_{\text{А}}$) и максимально возможное извлечение металла (критерий $M_{\text{Ме}}$).

2. На основании разработанных критериев исследованные отходы были классифицированы по 10-ти бальной шкале. Наиболее качественными отходами является сыпучая стружка сплава АК9ч (9 балл). Вьюнообразная стружка деформированных сплавов АМгб и Д16 – 6 балл. Наименее качественным шихтовым материалом по совокупности критериев является баночный лом (4-5 балл).

3. Исследованы различные технологические схемы прямого переплава сыпучей стружки сплава АК9ч. Установлено, что происхождение стружки оказывает наследственное влияние на структуру предварительного сплава. Сплав, полученный из переплава стружки от ПГФ-отливок, характеризуются укрупненными дендритами $\alpha\text{-Al}$ и кристаллами эвтектического кремния Si_3 .

4. В зависимости от технологической схемы переплава и вида стружки меняется металлургический выход годного (МВГ). При переплаве мелкой стружки МВГ варьируется в интервале 82-92%; крупной стружки 92-99%. Это связано с тем, что критерий $k_{\text{А}}$ у мелкой стружки имеет повышенные значения и свидетельствует о повышенном угаре и окислении поверхности при контакте с атмосферой.

5. Разработана комплексная технологическая схема переплава сыпучей стружки АК9ч, обеспечивающая МВГ на уровне 95-97% и получение предварительного сплава без шлаковых включений, газовых раковин и пористости. Химический состав предварительного сплава соответствует требованиям ГОСТ 1583-93 для сплава АК9ч.

6. Разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-09 «Рециклирование сыпучей стружки литейных сплавов системы Al-Si».

7. Разработана технологическая схема переплава кусковых отходов и вьюнообразной стружки для получения предварительных сплавов АМгб, обеспечивающая МВГ на уровне 93-95%. В структуре сплава не содержится шлаковых включений, газовых раковин и пористости. Химический состав предварительного сплава соответствует требованиям ГОСТ 4784-87 для сплава АМгб.

8. Разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-10 «Рециклирование вьюнообразной стружки деформируемых сплавов систем Al-Mg, Al-Cu».

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА И КОЛИЧЕСТВА ОТХОДОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СИНТЕЗИРОВАННЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

4.1 Синтезирование алюминиевых сплавов на основе критериев качества металлоотходов

Синтезирование сплавов выполняли с учетом критериев качества ломов и отходов, разработанных в п.3.1 [103, 104].

Сплавы готовили в печи сопротивления в графито-шамотной тигле.

Все отходы предварительно подготавливали к плавке: стружку (АК9ч, Д16, АМг6) подвергали магнитной сепарации, просушиванию от остатков смазочно-охлаждающей жидкости в сушильном шкафу при температуре 100-150⁰С; витую стружку и баночные отходы прессовали.

Кремний кристаллический использовали для приготовления лигатуры Al-Si₂₀ с целью обеспечения требуемого содержания данного элемента в силуминах. Стружку АМг6 и магний чушковый – для обеспечения требуемого содержания магния в сплаве АМг5. Стружку Д16 и электротехнические отходы меди применяли для приготовления сплава АК6М2 с целью обеспечения требуемого содержания меди.

Загрузку шихтовых компонентов по расчету осуществляли в предварительно приготовленный расплав из электротехнических отходов алюминия при температуре 720-730⁰С. Лигатуры (AlSi₂₀, AlSc₂, AlTi₅) загружали в расплав в последнюю очередь. Модифицирующую лигатуру AlSc₂ применяли для модифицирования сплава АМг5; AlTi₅ – для модифицирования сплава АК6М2.

В процессе приготовления силуминов использовали комплексную флюсовую композицию (КФК) «Эвтектика» (ТУ-ВУ 100196035.018-2010) для металлургического переплава мелкодисперсных алюминийсодержащих материалов. Дегазацию производили дегазирующей таблеткой для деформируемых и литейных сплавов на основе алюминия (ТУ РБ 14744129.004-98). Сплав АМг5 рафинирована-

ли карналлитовым флюсом (ТУ 1714-470-05785388-2011), дегазацию осуществляли аналогично силуминам. Приготовление сплавов производили под слоем жидкого флюса. Дегазирующие таблетки вводили в перфорированном стакане на дно жидкой ванны. Обработку расплавов производили при температуре 730-740⁰С.

Силумины заливали при температуре 720-730⁰С в кокиль, получая опытные отливки «Пластина» толщиной 15 мм. Пластины толщиной 6 мм из сплава АМг5 получали способом погружения металлической формы специальной конструкции в расплав при температуре 710-720⁰С [106]. Схема установки для получения пластин литьем погружением приведена на рисунке 4.1.

Шихтовые материалы, использованные для синтезирования сплавов, представлены в таблице 4.1.

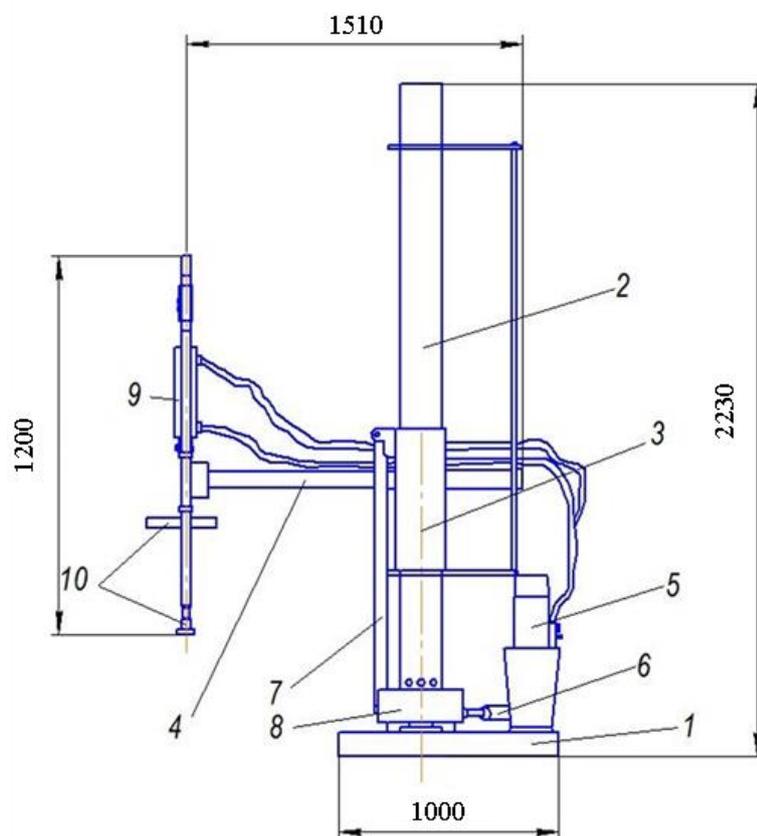
Таблица 4.1 - Шихтовые материалы для приготовления промежуточных сплавов

Марка сплава	Вид шихтового материала									
	Баночный лом	Стружка			Электротехнические отходы		Лигатуры			Магний Mg90
		АК9ч	Д16	АМг6	Al	Cu	AlSi20	ATi5	AlSc2	
АК7ч	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-
АК12	+	-	-	-	+	-	+	-	-	-
АК6М 2	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-
АМг5	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+

Химические составы синтезированных сплавов по основным и примесным элементам соответствовали требованиям нормативной документации (табл. 4.2).

Таблица 4.2 – Химические составы синтезированных предварительных сплавов

№ п/п	Марка сплава	Стандарт	Содержание элементов, %					
			Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Fe
1	АК7ч	Синтезированный	7,7	0,15	0,35	0,2	0,10	0,42
2		ГОСТ 1583-93	6,0-8,0	< 0,2	0,25-0,45	< 0,5	< 0,15	< 0,5
3	АК12	Синтезированный	12,5	0,43	0,05	0,45	0,09	0,5
4		ГОСТ 1583-93	10,0-13,0	< 0,6	< 0,1	0,01-0,5	< 0,1	< 0,7
5	АК6М2	Синтезированный	5,7	2,0	0,39	0,07	0,15	0,42
6		ГОСТ 1583-93	5,5-6,5	1,8-2,3	0,35-0,50	< 0,1	0,1-0,2	< 0,5
7	АМг5	Синтезированный	0,43	0,07	5,3	0,4	0,027	0,41
		ГОСТ 4784-97	< 0,5	< 0,1	4,8-5,8	0,3-0,8	0,02-0,1	< 0,5



- 1 – основание; 2 – поворотная колонна; 3 – подъемная колонна;
 4 – поворотная траверса;
 5 – гидростанция; 6 – горизонтальный гидроцилиндр; 7 – вертикальный гидроцилиндр;
 8 – распределительная коробка; 9 – гидроцилиндр для раскрытия кокиля;
 10 – узел крепления кокиля

Рисунок 4.1 – Манипулятор для литья погружением

МВГ составил $82\div 96$ % в зависимости от марки синтезированного сплава (рис. 4.2). Самый низкий выход годного был установлен для сплава АК12, при синтезировании которого доля баночных отходов составляла порядка 80%. Полученные данные по выходу годного достаточно хорошо коррелируют с установленными критериями качества для данного вида отходов (п. 3.1).

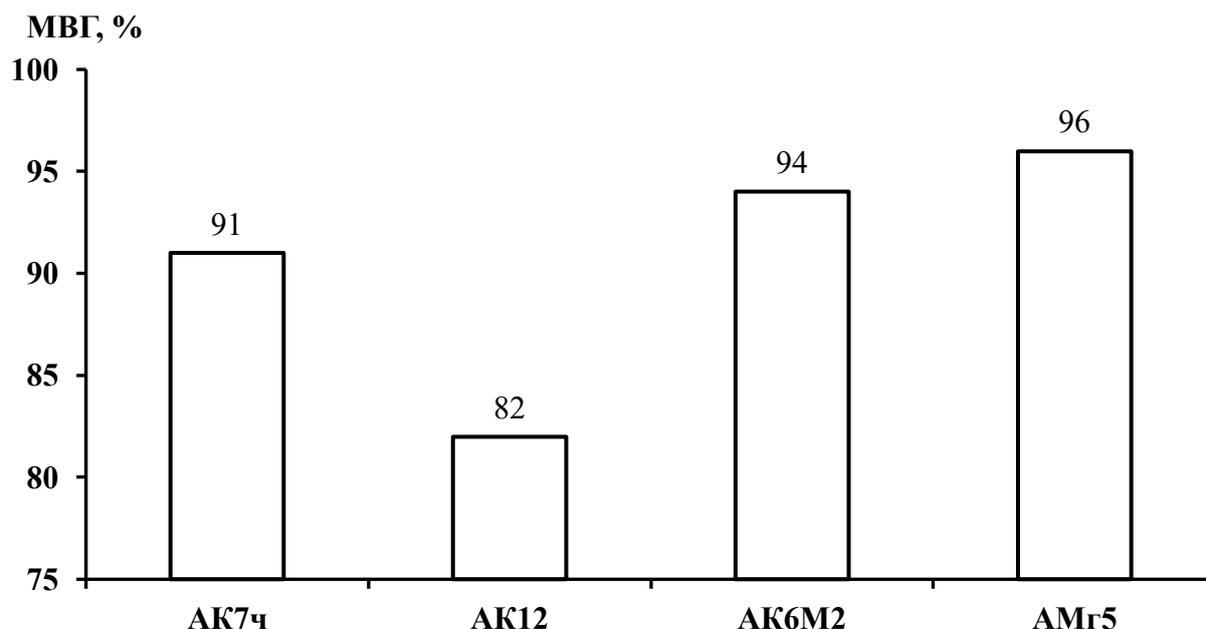
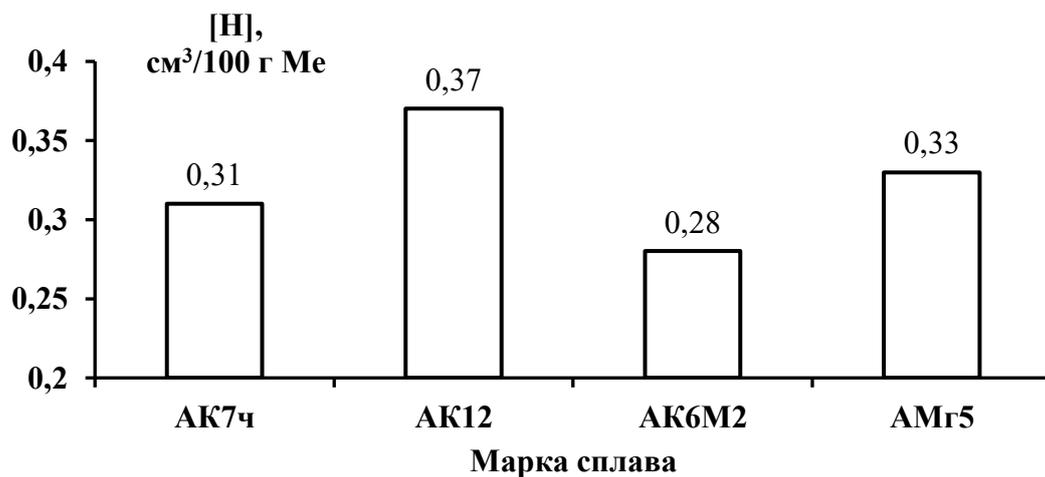
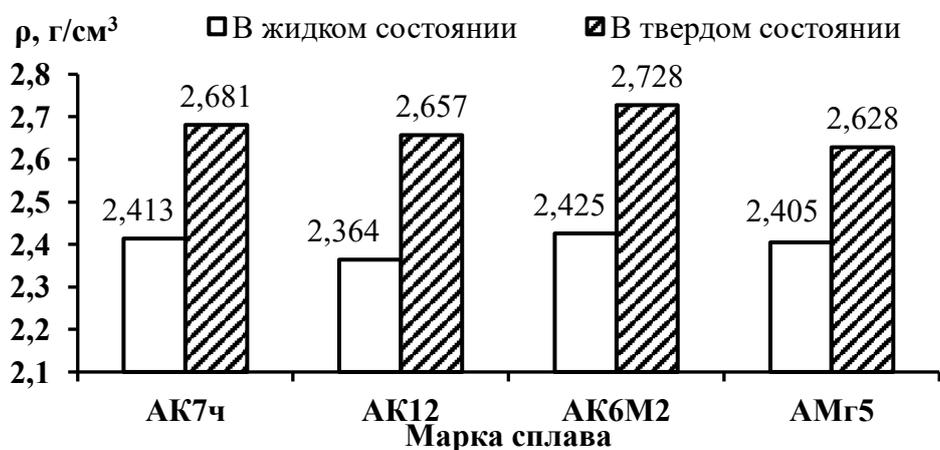


Рисунок 4.2 – Металлургический выход годного в зависимости от марки сплава

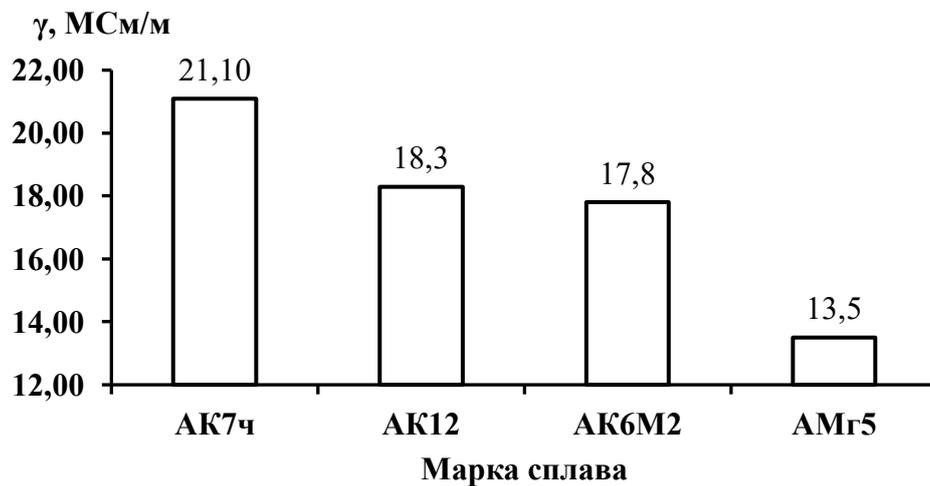
Установлены зависимости содержания водорода, плотностей в жидком и твердом состояниях и электропроводности от марки синтезированного сплава (рис. 4.3). Самое высокое содержание водорода ($0,37 \text{ см}^3/100 \text{ г Me}$) установлено для сплава АК12, полученного с использованием в составе шихты баночного лома. Это, вероятно, связано с тем, что баночный лом характеризуется высоким значением критерия k_A ($19,3 \text{ мм}^{-1}$) и низким значением критерия чистоты $k_{\text{ч}}$ ($0,91$). Развитая поверхность и необходимость удаления лакового покрытия с баночного лома перед его рециклированием обуславливает повышенную степень окисления поверхности и, как следствие, высокое газосодержание в сплаве.



а



б



в

а – содержание водорода; б – плотность в жидком и твердом состояниях;

в – электропроводность

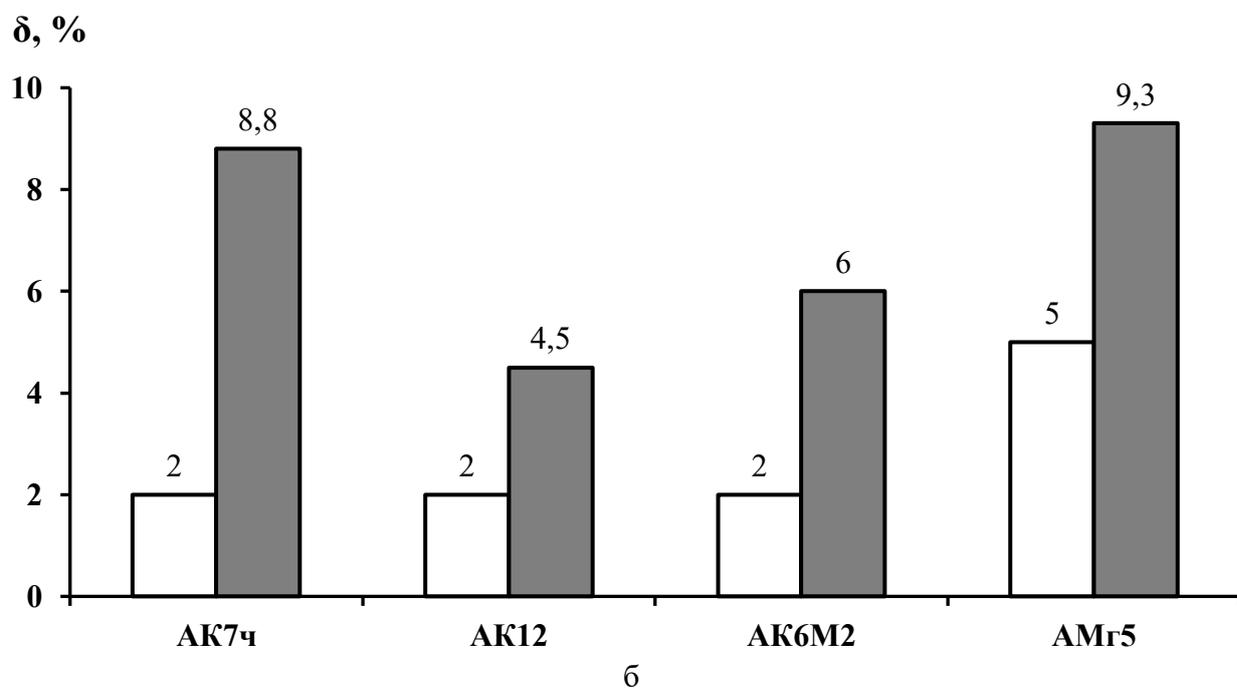
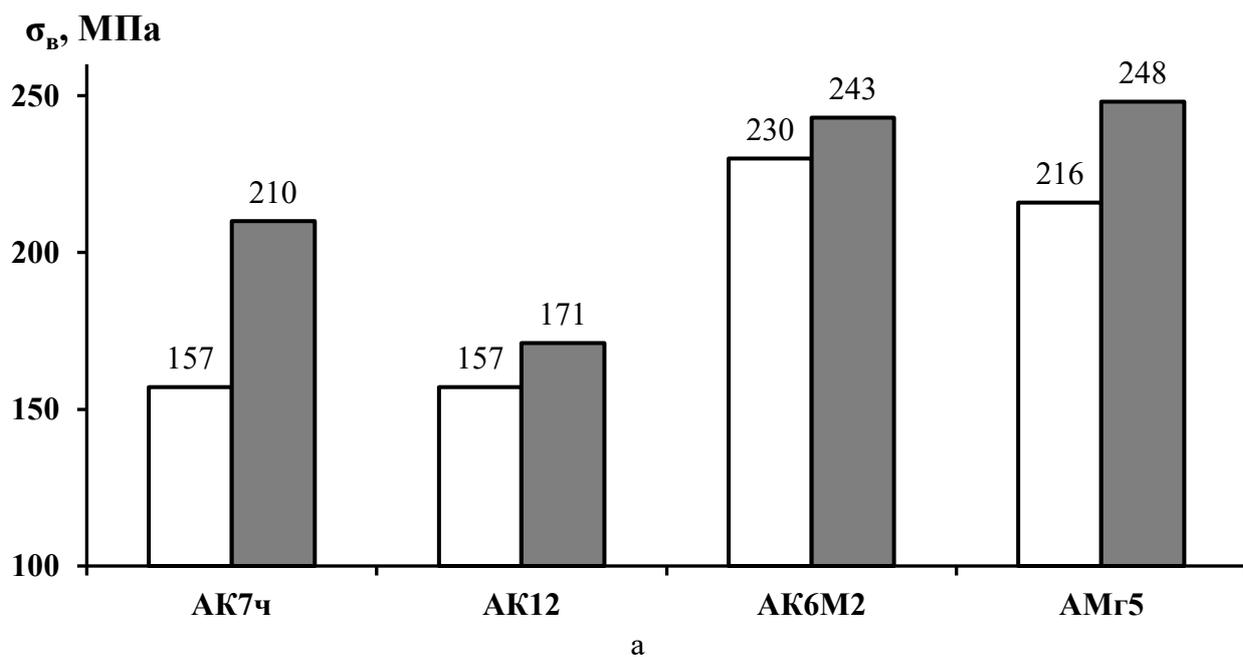
Рисунок 4.3 – Физические свойства синтезированных сплавов

Самое низкое содержание водорода получено для сплава АК6М2 (0,28 см³/100 г Me). В качестве одного из легирующих компонентов в сплаве АК6М2 присутствует титан, который является геттером для водорода, связывая его в устойчивые гидриды. При определении газосодержания методом вакуумной экстракции связанный водород не экстрагируется из расплава. Наибольшей плотностью в жидком и твердом состояниях характеризуется сплав АК6М2 в связи с тем, что в его составе присутствуют медь и титан. Фактором, обуславливающим повышенные значения плотности, является также и содержание водорода. Электропроводность в большей степени в данном эксперименте отражает влияние суммы легирующих и примесных элементов. Наибольшей степенью легированности характеризуется сплав АК6М2, что и определяет его низкую электропроводность по сравнению с остальными синтезированными сплавами.

На рисунке 4.4 представлены результаты механических испытаний синтезированных сплавов в литом состоянии. Свойства сплава АМг5 сравнивали с литейным сплавом марки АМг5Мц (ГОСТ1583-93), которые имеет близкий химический состав. Испытания механических свойств показали, что синтезированные сплавы имеют гарантированный запас прочности и пластичности по сравнению с требованиями нормативной документации.

На рисунке 4.5 представлены типичные фрагменты микроструктур синтезированных сплавов. Анализ полученных данных показал, что в микроструктуре синтезированных сплавов отсутствует газовая пористость и неметаллические включения.

Немодифицированные и модифицированные (0,003% Sc по массе) образцы из сплава АМг5 подвергали прокатке в холодном состоянии в несколько проходов до образования трещин. На образце из немодифицированного сплава трещины появились после 10-го прохода (рис. 4.6, *а*). Образец из модифицированного сплава выдержал 12 проходов (рис. 4.6, *б*). Степень деформации по толщине образца из немодифицированного сплава составила 60,5%; для модифицированного – 67,2%.

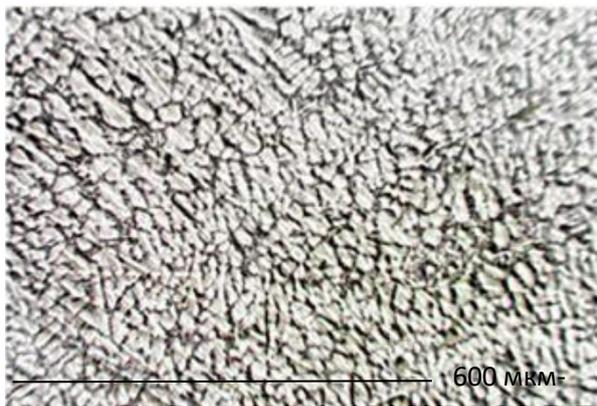


а – предел прочности при растяжении; б – относительное удлинение;

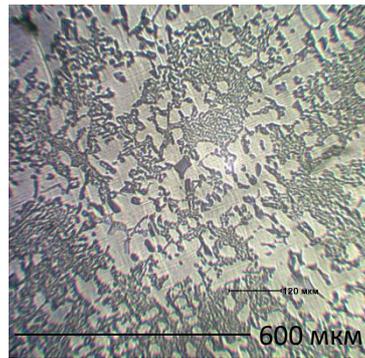
светлые столбцы – требования по ГОСТ 1583-93, не менее;

темные столбцы – фактические значения

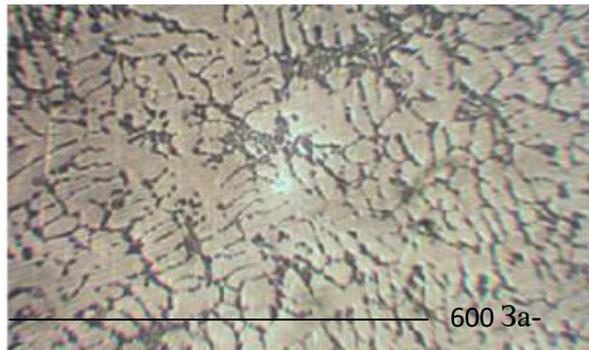
Рисунок 4.4 - Механические свойства синтезированных сплавов в литом состоянии



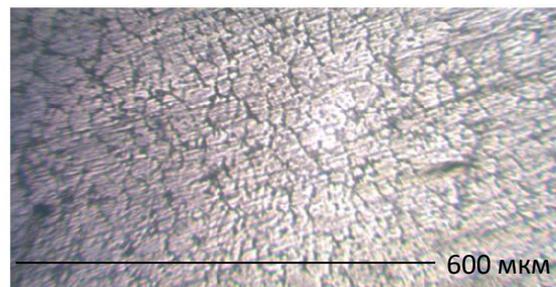
а



б



в



г

а – АК7ч; б – АК12; в – АК6М2; г – АМг5 (модифицированный лигатурой $AlSc_2$; 0,003% Sc по массе)

Рисунок 4.5 - Микроструктура синтезированных сплавов



а



б

а – из немодифицированного сплава; б – из модифицированного сплава

Рисунок 4.6 - Склонность к деформационной обработке синтезированного сплава АМг5

Таким образом, на основании выполненных исследований установлено, что синтезирование сплавов с учетом разработанных критериев качества рециклируемых ломов и отходов позволяет обеспечивать высокие уровни выхода годного металла, механических свойств и параметров структуры.

Вовлечение в состав шихты определенной доли деформированных отходов оказывает положительное наследственное влияние на комплекс качественных характеристик синтезированных сплавов.

На примере сплава АМг5, полученного с использованием в составе шихты оптимального соотношения деформированных рециклируемых отходов в сочетании с модифицированием микрокристаллической лигатурой AlSc₂, показано что, обеспечивается получение сплава с хорошей склонностью к деформационной обработке.

4.2 Исследование влияния вида и количества отходов на модифицируемость синтезируемых сплавов

В реальных производственных условиях для получения фасонных отливок используются различные шихтовые материалы: чушковые сплавы, лигатуры, возврат собственного производства, переплавы технологических остатков, различные виды отходов и т.д. Каждый элемент шихты содержит в себе определенную структурную информацию, которая оказывает наследственное влияние на качество рабочих сплавов и литых изделий из них. Такое многообразие структурной информации в многофакторной системе «шихта-расплав-литое изделие» затрудняет понимание механизмов модифицирования и управление ими [23, 30].

В связи с вышесказанным исследовали влияние деформированных отходов в составе шихты на эффективность модифицирования сплавов систем Al-Si-Mg и Al-Mg добавками микрокристаллических лигатур AlSr₁₀ и AlTi₅ [107].

Эксперименты проводили на литейных сплавах АК9ч (система Al-Si-Mg) и АМгбл (система Al-Mg), химические составы которых даны в таблице 4.3,4.4.

Таблица 4.3 - Химический состав сплава АК9ч (ГОСТ 1583-93)

Основные легирующие, %			Примеси, %, не более				
Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Ni	Ti+Zr
8,0-10,5	0,20-0,35	0,2-0,5	0,5	0,3	0,3	0,1	0,12

Таблица 4.4 - Химический состав сплава АМгбл (ГОСТ 1583-93)

Основные легирующие, %				Примеси, %, не более				
Mg	Zr	Be	Ti	Fe	Mn	Cu	Zn	Si
6,0-7,0	0,05-0,20	0,02-0,10	0,05-0,15	0,02	0,1	0,15	0,10	0,20

В таблице 4.5, 4.6 представлены шихтовые материалы, использованные для приготовления сплавов АК9ч и АМгбл.

Таблица 4.5 - Шихтовые материалы для приготовления сплава АК9ч

№ п/п	Шихтовые материалы	Вид, характеристика
Вариант КI		
1	Алюминий первичный марки А5 ГОСТ 11069-2001	Первичный чушковый алюминий
2	Лигатура AlSi20 ГОСТ 53777-2010	Чушковая лигатура
3	Магний чушковый Mg90 ГОСТ 804-93	Первичный чушковый магний
4	Лигатура AlMn10 ГОСТ 53777-2010	Чушковая лигатура
5	Отходы сплава АК9ч ГОСТ 54564-2011	Литой возврат собственного производства в виде прибылей, образующихся при литье в кокиль
6	Лигатура AlSr10 ГОСТ 53777-2010	Микрокристаллическая лигатура для модифицирования структуры, полученная кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе
Вариант КII		
7	Алюминий электротехнический марки А5Е	Электротехнические отходы в виде проволоки \varnothing 3-5 мм
8	Магний чушковый Mg90 ГОСТ 804-93	Первичный чушковый магний
9	Лигатура AlSi20 ГОСТ 53777-2010	Чушковая лигатура
10	Отходы сплава 3104 (Al-Mn-Mg) ГОСТ 54564-2011	Баночный лом
11	Лигатура AlSr10 ГОСТ 53777-2010	Микрокристаллическая лигатура для модифицирования структуры, полученная кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе

Таблица 4.6 - Шихтовые материалы для приготовления сплава АМгбл

№ п/п	Шихтовые материалы	Вид, характеристика
Вариант МІ		
1	Алюминий первичный марки А85 ГОСТ 11069-2001	Первичный чушковый алюминий
2	Магний чушковый марки Мг95 ГОСТ 804-93	Первичный чушковый магний
3	Отходы сплава АМгбл ГОСТ 54564-2011	Литые отходы, образующиеся при литье в песчано-глинистые формы, в виде прибылей
4	Лигатура АlTi5 ГОСТ 53777-2010	Микрокристаллическая лигатура для модифицирования структуры, полученная кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе
5	Лигатура АlBe3 ГОСТ 53777-2010	Чушковая лигатура
Вариант МІІ		
6	Алюминий первичный марки А85 ГОСТ 11069-2001	Первичный чушковый алюминий
7	Магний чушковый марки Мг95 ГОСТ 804-93	Первичный чушковый магний
8	Отходы сплава АМгбл ГОСТ 54564-2011	Деформированные отходы в виде пластин толщиной 2 мм
9	АlTi5 ГОСТ 53777-2010	Микрокристаллическая лигатура для модифицирования структуры, полученная кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе
10	Лигатура АlBe3 ГОСТ 53777-2010	Чушковая лигатура

Составы шихт по вариантам КІ (АК9ч) и МІ (АМгбл) включали в себя, в основном, чушковые шихтовые материалы и литой возврат собственного производства в виде прибыльных частей литниково-питающих систем ПГФ-отливок. В составы шихт по вариантам КІІ (АК9ч) и МІІ (АМгбл) вместо литого возврата собственного производства были введены деформированные отходы (Д-шихта).

Применяемые отходы перед загрузкой в плавильную печь предварительно очищали и обезжиривали. Очищенные от лакового покрытия баночные лома подвергали прессованию в брикеты. Сплавы готовили в индукционной тигельной печи марки УИП-001 (РЭЛТЭК, РФ) в графитовом тигле емкостью 10 кг по Аl. Модифицирование лигатурами (АlSr20 – для АК9ч; АlTi5 – для АМгб) не осуществляли. Перед разливкой при температуре 750 ± 5 °С расплав АК9ч рафинировали комплексной флюсовой композицией (КФК) «Эвтектика» (ТУ-ВУ 100196035.018-2010); расплав АМгб - карналлитовым флюсом (ТУ 1714-470-05785388-2011). По-

сле выдержки в течение 20 мин с зеркала расплава снимали шлак, перемешивали и производили разливку в чугунные изложницы. Далее полученные шихтовые заготовки переплавляли отдельно в тигельных печах сопротивления GRAFICARBO GF.1100 в графитовых тиглях емкостью 1 кг по Al. Модифицирование расплавов лигатурами производили при $t = 720 \div 730$ °С, и после выдержки в течении 15 мин осуществляли заливку в кокиль, получая опытные отливки типа «Пластина» толщиной 15 мм. Лигатуру AlSr20 вводили в сплав АК9ч из расчета 0,04; 0,06; 0,08 масс. % по стронцию; лигатуру AlTi5 в сплав АМгбл – из расчета 0,02; 0,04; 0,06 масс. % по титану.

Химические составы опытных сплавов, полученных по различным вариантам шихтовых составов (таблица 4.5 и 4.6, соответственно) до введения модифицирующих лигатур приведены в таблице 4.7, 4.8.

Таблица 4.7 - Химический состав опытных сплавов АК9ч

Вариант состава шихты	Основные легирующие, %			Примеси, %				
	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Ni	Ti
КI	9,5	0,27	0,3	0,25	0,03	0,03	0,01	0,05
КII	9,43	0,26	0,3	0,26	0,15	0,03	0,01	0,05

Таблица 4.8 - Химический состав опытных сплавов АМгбл

Вариант состава шихты	Основные легирующие, %				Примеси, %, не более				
	Mg	Zr	Be	Ti	Fe	Mn	Cu	Zn	Si
MI	6,45	0,08	0,070	0,08	0,018	0,020	0,060	0,030	0,020
MII	6,51	0,07	0,071	0,08	0,019	0,017	0,061	0,028	0,015

Влияние состава шихты и модифицирование добавками стронция на газосодержание и плотность в жидком и твердом состояниях сплава АК9ч показано в таблице 4.9 и на рисунке 4.7.

Таблица 4.9 – Влияние состава шихты и модифицирования на газосодержание и плотность синтезированного сплава АК9ч

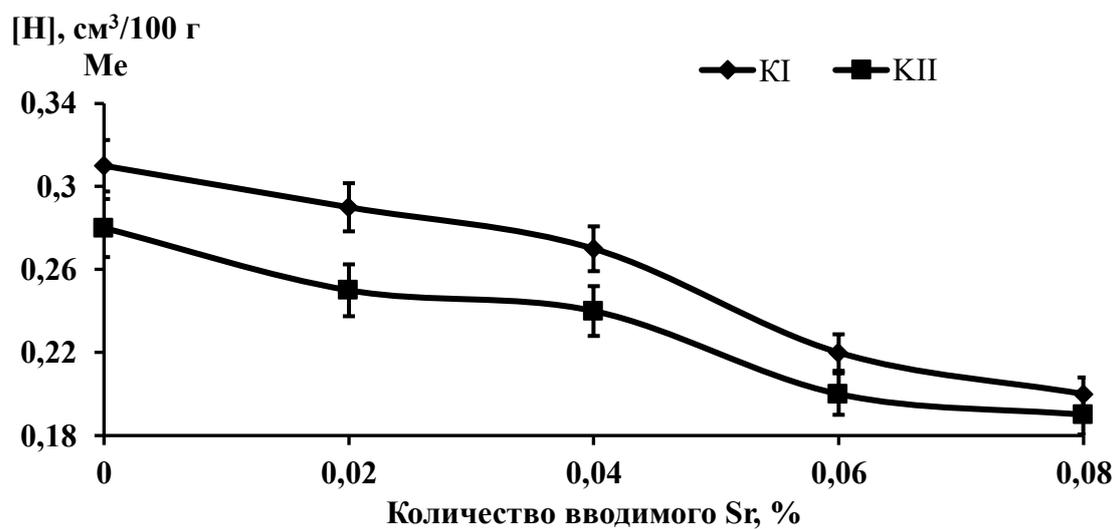
Вариант шихты	Количество вводимого Sr, %	[H], см ³ /100 г Me	Плотность, г/см ³	
			В жидком	В твердом
KI	0	0,31	2,412	2,681
	0,02	0,29	2,418	2,687
	0,04	0,27	2,421	2,689
	0,06	0,22	2,423	2,691
	0,08	0,20	2,425	3,693
KII	0	0,28	2,420	2,688
	0,02	0,25	2,422	2,691
	0,04	0,25	2,425	2,693
	0,06	0,20	2,428	2,695
	0,08	0,19	2,427	2,695

Анализ полученных результатов показывает следующие общие тенденции не зависимо от состава шихты:

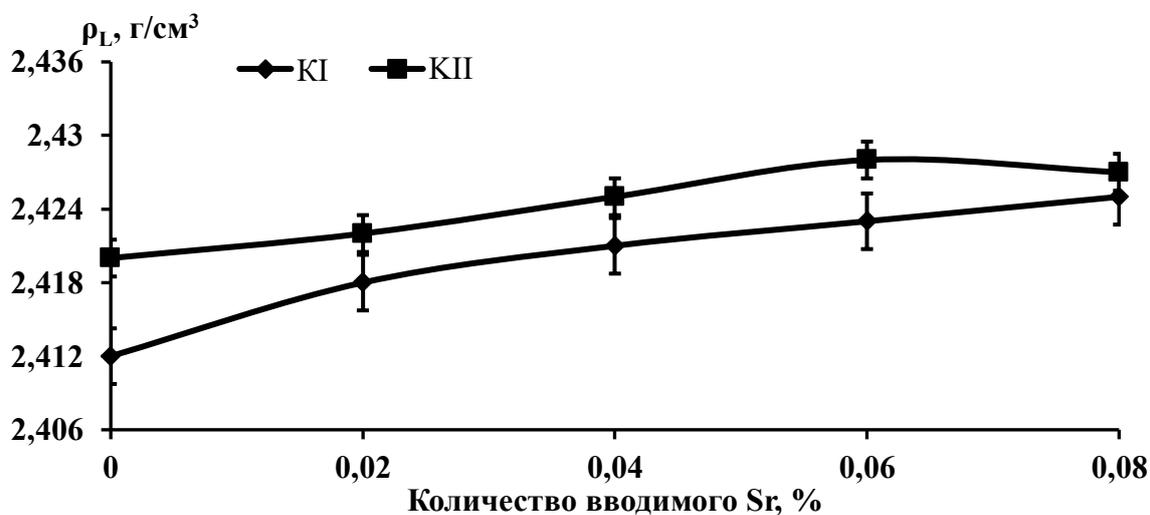
- модифицирование снижает содержание водорода в сплаве (рис. 4.7, а);
- с увеличением количества вводимого стронция плотности сплавов в жидком и твердом состояниях увеличиваются (рис. 4.7, б, в).

Сплав, полученный из шихты по варианту KII с использованием баночного лома, характеризуется пониженным газосодержанием и повышенными плотностями по сравнению со сплавом, в составе шихты которого использовался возврат собственного производства в виде прибыльных частей кокильных отливок (вариант шихты KI).

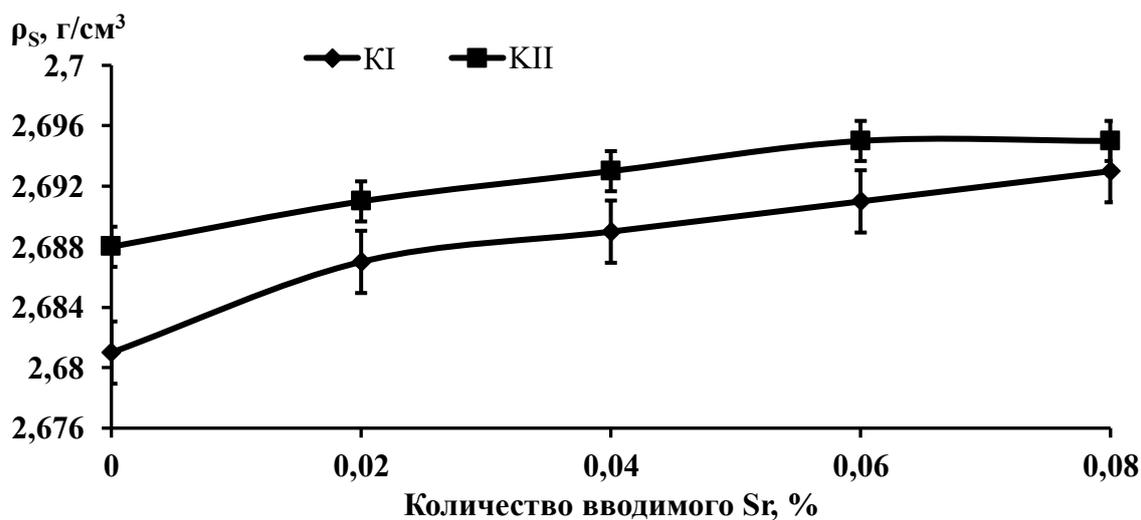
Известно, что плотность является структурно чувствительным свойством. Разница в плотностях расплавов показывает, что наследственное влияние структуры шихты сохраняется в жидком состоянии и транслируется затем в твердое состояние в процессе кристаллизации. Наиболее наглядно это прослеживается на зависимости плотности расплава от содержания водорода (рис. 4.8).



а



б



в

а – содержание водорода; б, в – плотность в жидком (ρ_L) и твердом (ρ_S) состояниях, соответственно

Рисунок 4.7 – Влияние состава шихты и модифицирования на физические свойства синтезированного сплава АК9ч

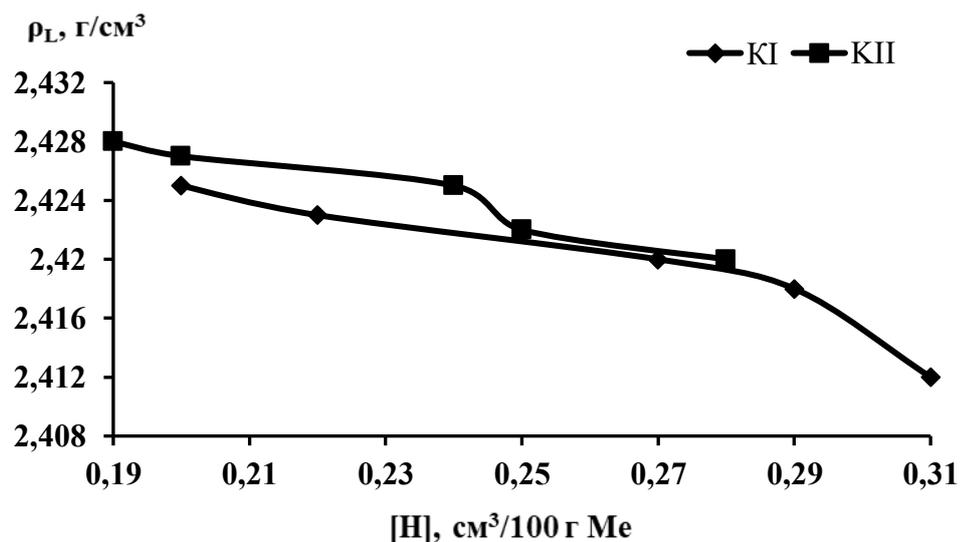
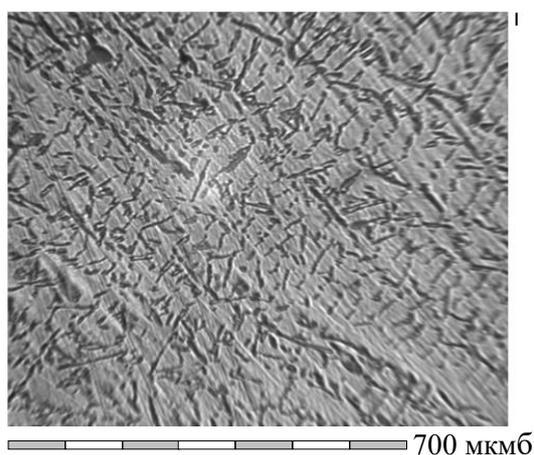
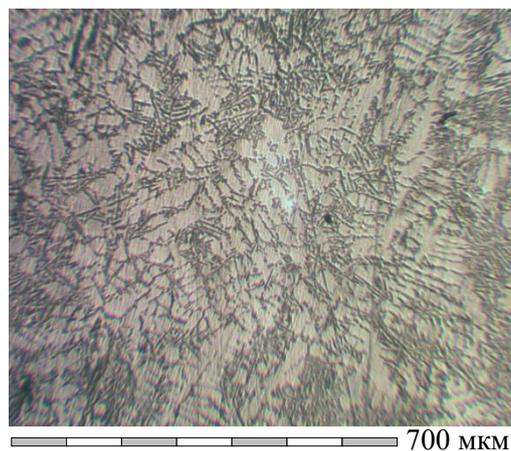


Рисунок 4.8 – Влияние содержания водорода на плотность сплава АК9ч в жидком состоянии в зависимости от состава шихты

Микроструктуры опытного сплава АК9ч в зависимости от варианта шихты до модифицирования лигатурой AlSr20 показаны на рисунке 4.9. Видно, что приготовление сплава по варианту шихты КII (рис. 4.9, б) способствует формированию более измельченных фазовых составляющих по сравнению с вариантом KI (рис. 4.9, а).



а

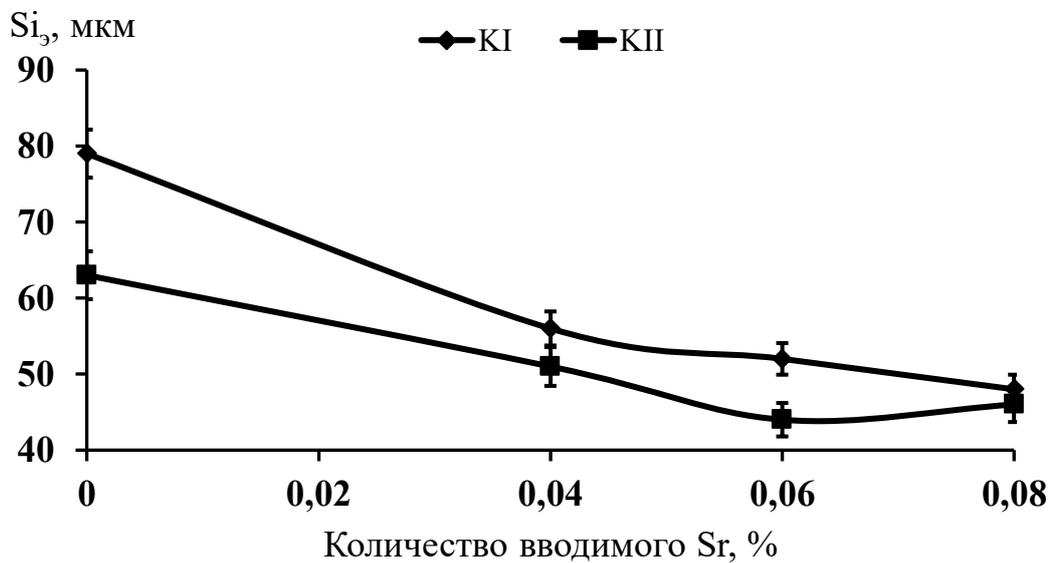
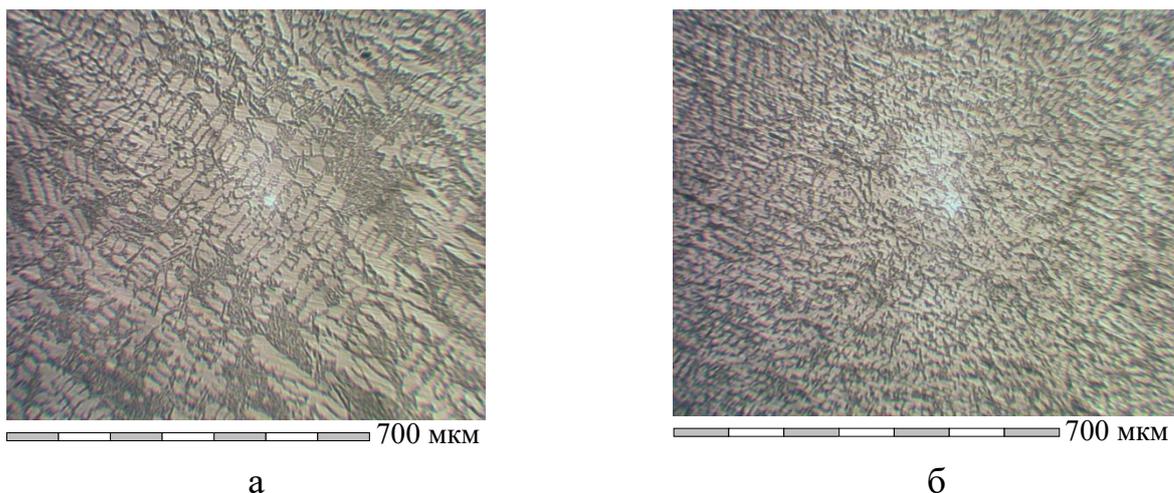


б

а, б – составы шихты KI и KII, соответственно (по табл. 4.5)

Рисунок 4.9 - Микроструктура опытного сплава АК9ч до модифицирования

Сохранение структурной информации от Д-шихты и ее трансляция через жидкое состояние подтверждается сравнительным анализом микроструктуры сплавов, полученных по вариантам шихты КI и КII (рис. 4.10). При одинаковом количестве введенного стронция, сплав, приготовленный по варианту КI, характеризуется укрупненными размерами дендритов α -Al и кристаллами Si_3 , по сравнению со сплавом, приготовленным по варианту КII (рис. 4.10, в).



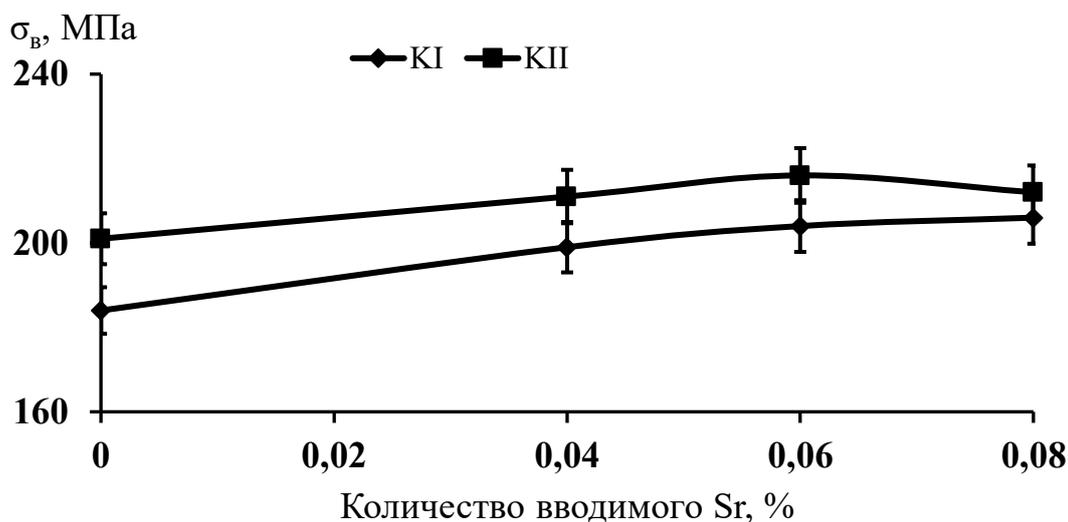
в

а, б – микроструктура сплавов, полученных по вариантам КI и КII при введении 0,06% Sr, соответственно;
в – влияние количества Sr на размеры Si_3

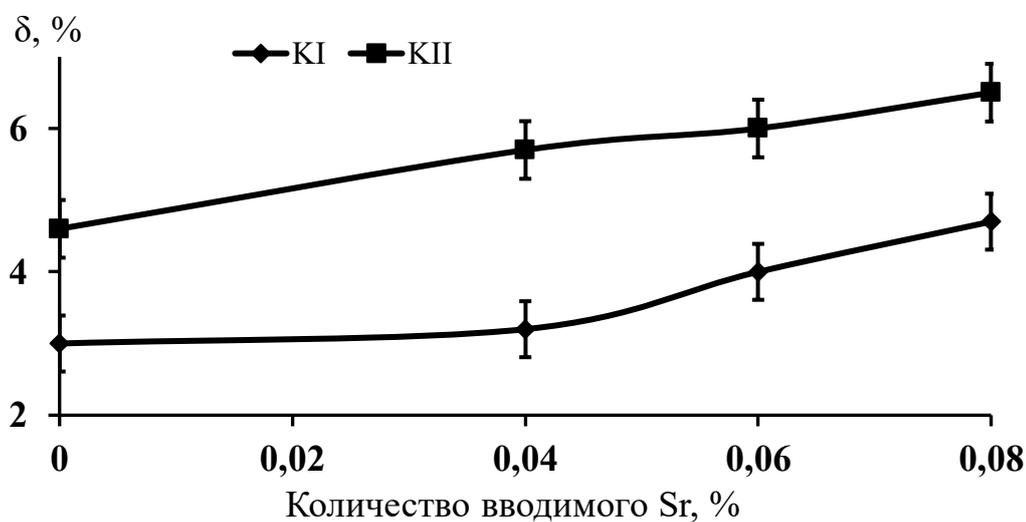
Рисунок 4.10 - Влияние состава шихты на структуру и размеры эвтектического кремния Si_3 сплава АК9ч

На рисунке 4.11 представлено влияние состава шихты и модифицирования на механические свойства сплава АК9ч в литом состоянии. Анализ результатов, представленных на рисунке 4.11, показывает, что состав шихты оказывает наследственное влияние на склонность сплава к модифицированию. Модифицирование стронцием способствует росту механических свойств сплава. Однако, при одинаковых химических составах, сплав, полученный из шихтовых материалов по варианту КI, характеризуется пониженными пределом прочности (рис. 4.11, *a*) и относительным удлинением (рис. 4.11, *б*) по сравнению со сплавом, полученным по варианту КII, во всем исследованном диапазоне вводимого Sr. Кроме того, предел прочности (рис. 4.11, *a*) сплава, полученного из шихты по варианту КII, достигает максимума при введении стронция в количестве 0,06%, а затем снижается. Установленный эффект можно объяснить перемодифицированием сплава, приготовленного с использованием в составе Д-шихты в виде деформированных ломов электротехнического алюминия и банок.

Прибыли, обеспечивающие питание отливки в форме, затвердевают в последнюю очередь, что обуславливает формирование в них крупнокристаллической структуры и повышенной газоусадочной пористости. Такая отрицательная структурная информация наследуется и транслируется через жидкое состояние в рабочий сплав, что проявляется в комплексе свойств и структурных характеристик сплава АК9ч, приготовленного по варианту шихты КI.



а



б

а, б – предел прочности при растяжении и относительное удлинение, соответственно
 Рисунок 4.11 - Влияние состава шихты на механические свойства сплава АК9ч при модифицировании

В экспериментах на сплаве АМгб замена в составе шихты крупнокристаллических литых отходов в виде прибыльных частей ПГФ-отливок (вариант шихты МI) на деформированные отходы (вариант шихты МII) способствовала измельчению макрозерна сплава АМгбл до модифицирования (рис. 4.12).



а, б – составы шихты МІ и МІІ, соответственно (по табл. 4.6)

Рисунок 4.12 - Макроструктура опытного сплава АМгбл до модифицирования

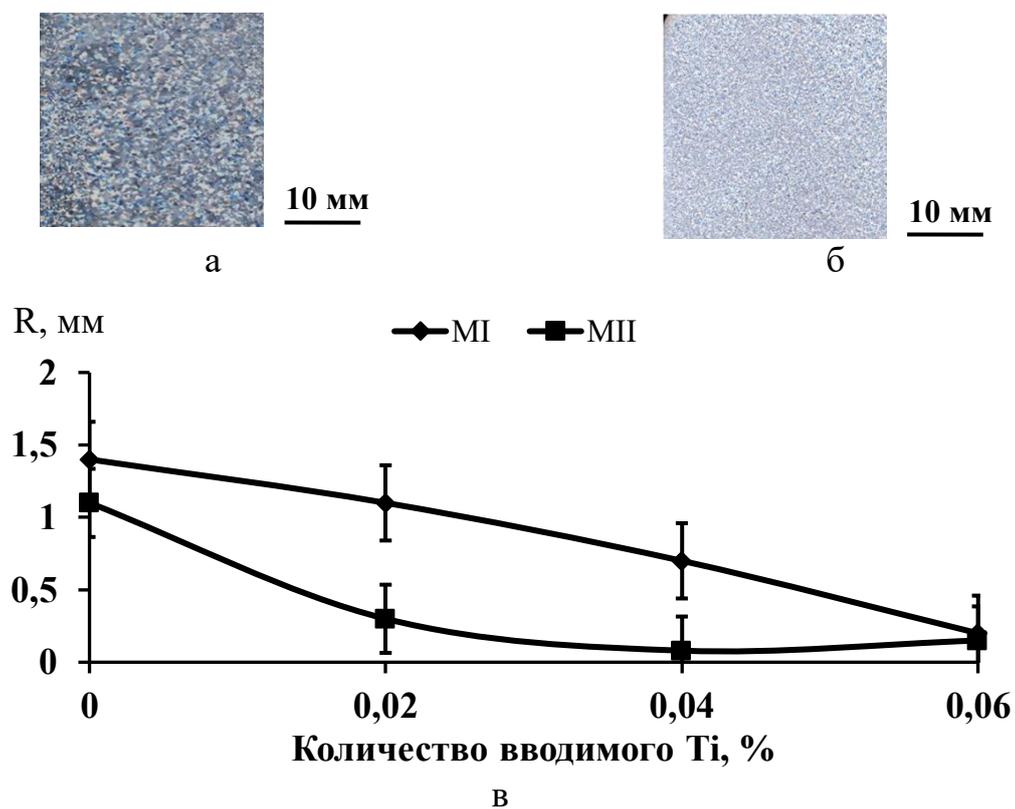
Сохранение структурной информации от Д-шихты и ее трансляция через жидкое состояние подтверждается сравнительным анализом макроструктуры сплавов, полученных по вариантам МІ и МІІ (рис. 4.13). Сплав, полученный по варианту МІІ, характеризуется меньшими размерами макрозерен (R) во всем исследованном интервале вводимого титана.

В табл. 4.10, рис. 4.14, 4.15 представлены результаты по влиянию состава шихты и модифицирования добавками титана на содержание водорода и плотность сплава АМгбл.

Таблица 4.10 – Влияние состава шихты и модифицирования на газосодержание и плотность синтезированного сплава АМгбл

Вариант шихты	Количество вводимого Ti, %	[H], см ³ /100 г Me	Плотность, г/см ³	
			В жидком	В твердом
МІ	0	0,34	2,406	2,628
	0,02	0,31	2,409	2,631
	0,04	0,29	2,412	2,633
	0,06	0,27	2,418	2,637
МІІ	0	0,30	2,410	2,640
	0,02	0,29	2,412	2,643
	0,04	0,27	2,418	2,644
	0,06	0,24	2,421	2,647

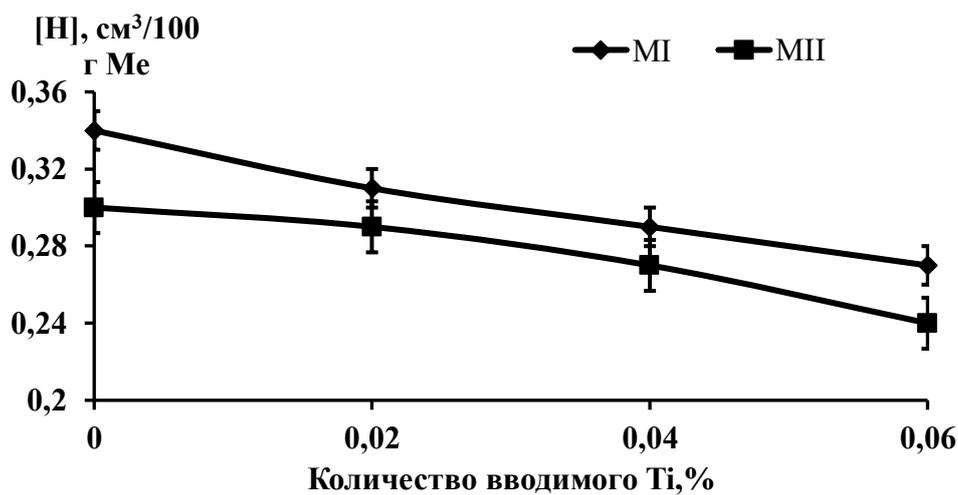
На рисунке 4.16 показано влияние состава шихты и модифицирования на механические свойства сплава АМгб в литом состоянии.



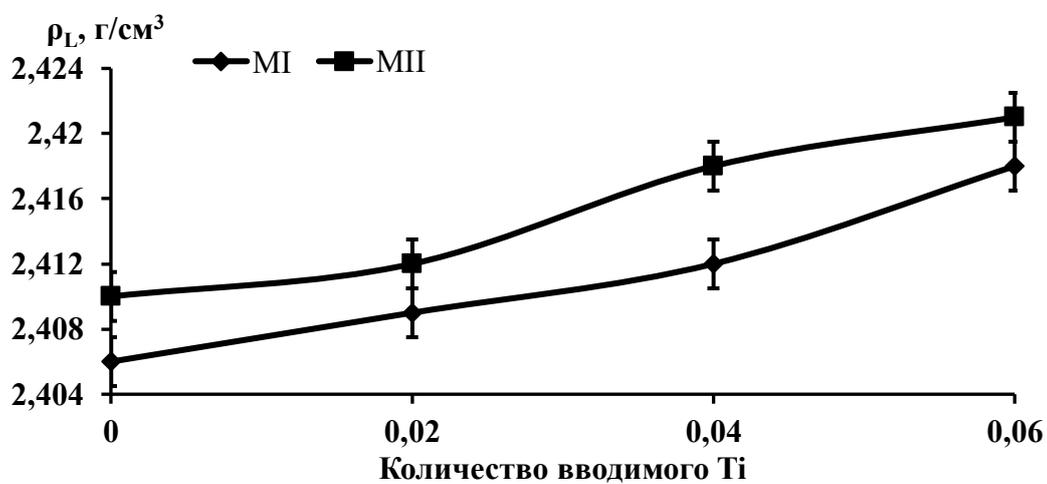
а, б – макроструктура сплавов, полученных по вариантам MI и MII, при введении 0,04% Ti, соответственно;

в – влияние количества Ti на размеры макрозерна

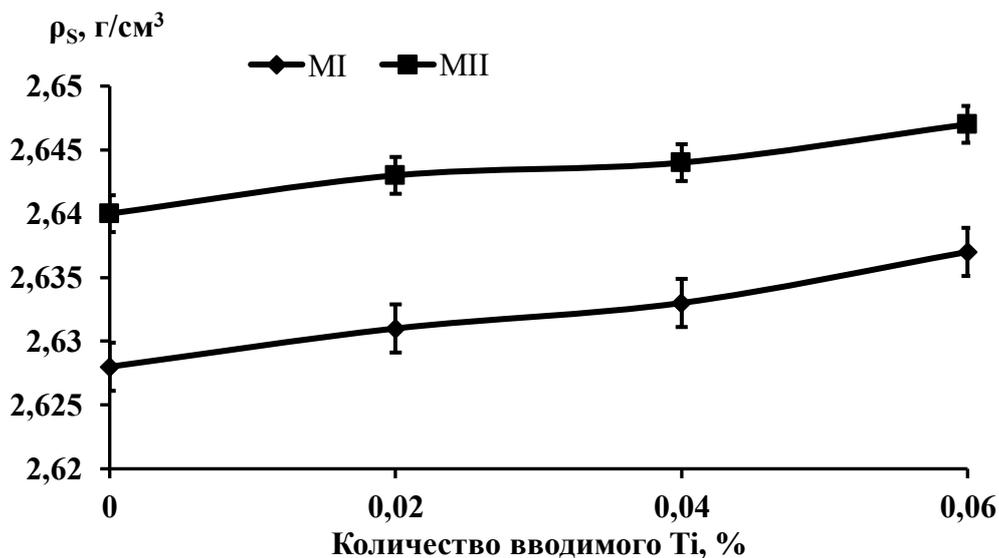
Рисунок 4.13 - Влияние состава шихты на размеры макрозерна сплава АМгбл



а



б



в

а – содержание водорода; б, в – плотность в жидком и твердом состояниях

Рисунок 4.14 – Влияние состава шихты и модифицирования на физические свойства синтезированного сплава АМгбл

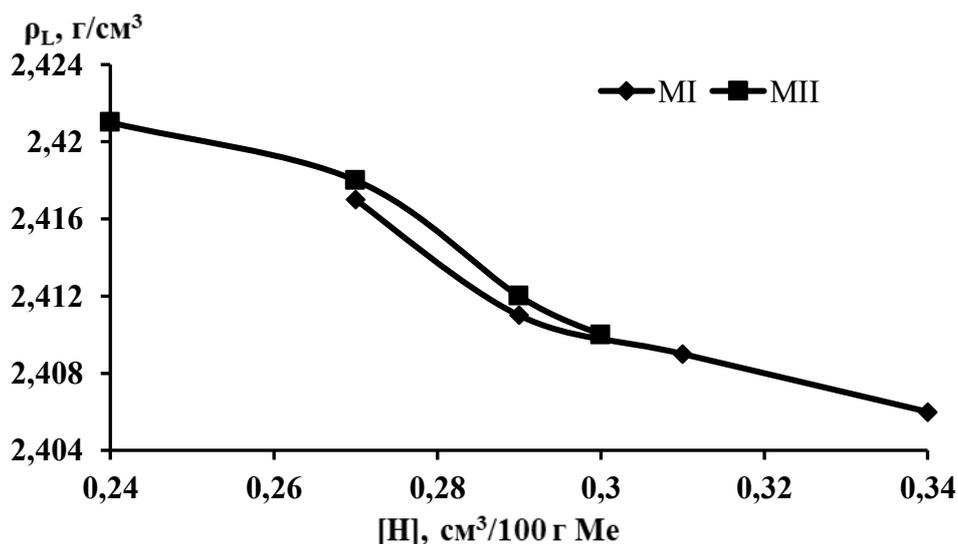


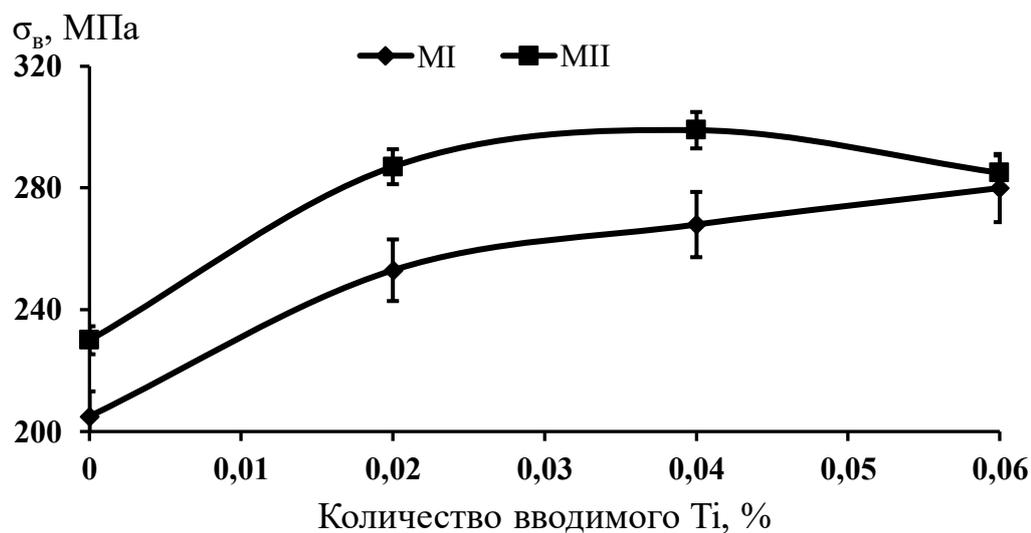
Рисунок 4.15 - Влияние содержания водорода на плотность сплава АМгбл в жидком состоянии в зависимости от состава шихты

Совокупный анализ полученных результатов в экспериментах со сплавом АМгбл подтвердил тенденции по влиянию состава шихты, установленные для сплава АК9ч.

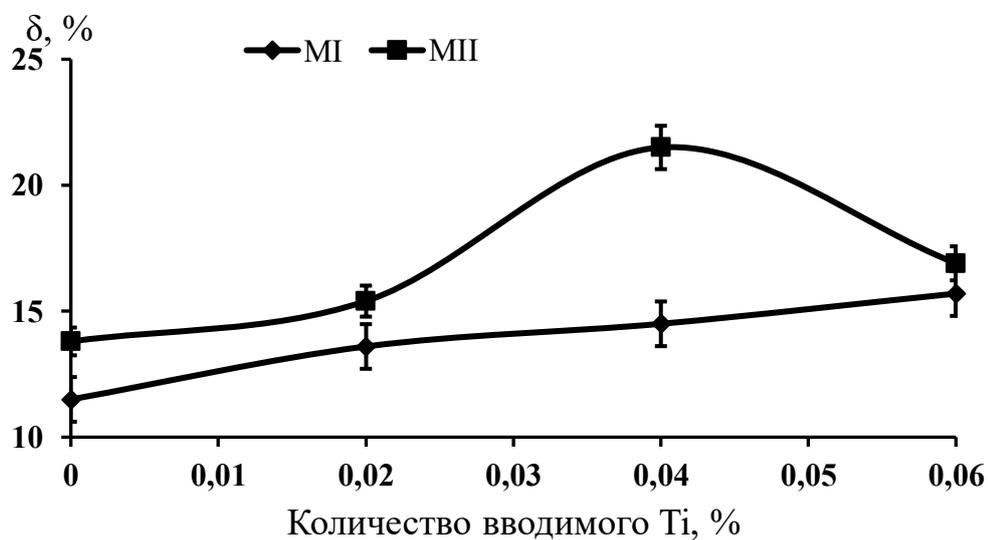
С увеличением количества вводимого титана происходит измельчение макрозерна алюминия, снижается содержание водорода, повышается плотность сплава в жидком и твердом состояниях, растут предел прочности и относительное удлинение в литом состоянии.

Однако, при одинаковых химических составах, сплав, полученный из шихтовых материалов по варианту MI, характеризуется худшими показателями во всем исследованном диапазоне вводимого Ti по сравнению со сплавом, полученным по варианту шихты MII:

- более крупный размер макрозерен (рис. 4.13);
- повышенное газосодержание и пониженные плотности в жидком и твердом состояниях (рис. 4.14, 4.15);
- пониженными пределом прочности (рис. 4.16, а) и относительным удлинением (рис. 4.16, б).



а



б

а, б – предел прочности при растяжении и относительное удлинение, соответственно
 Рисунок 4.16 - Влияние состава шихты на механические свойства сплава АМгбл при модифицировании

Кроме того, предел прочности и относительное удлинение сплава, полученного из шихты по варианту МII, достигают максимума при введении титана в количестве 0,04%, а затем снижаются. Установленный эффект можно объяснить перемодифицированием сплава, приготовленного с использованием в составе Д-шихты в виде деформированных листовых отходов сплава АМгбл.

Таким образом, введение в состав шихты деформированных отходов (варианты КII и МII) вместо крупнокристаллического возврата собственного производства в виде прибыльных частей отливок обуславливает формирование более измельченной структуры рабочих сплавов АК9ч и АМГ6л. Наследственное влияние Д-шихты сохраняется и при модифицировании сплавов лигатурами AlSr20 (АК9ч) и AlTi5 (АМГ6л). Эффективность модифицирования увеличивается при использовании Д-шихты при меньших количествах вводимых модификаторов. Влияние структуры Д-шихты сохраняется в течение длительного времени во взаимосвязанной системе «шихта-расплав-литое изделие». В данном случае сохранение и трансляция унаследованной структурной информации через жидкое состояние объясняется следующими закономерностями явления структурной наследственности [23]:

- унаследованные дисперсные частицы и кластеры в расплаве являются генами структурной информации шихтового материала;
- унаследованные расплавом дисперсные частицы и кластеры являются потенциальными дозародышами и центрами кристаллизации.

4.3 Разработка технологии синтезирования алюминиевых сплавов с максимальным вовлечением отходов в состав шихты

В данной серии экспериментов предметами исследования являлись литейные сплавы марок АК9ч и АК12 (система Al-Si), АМГ6л (система Al-Mg).

За основу экспериментов были приняты оптимальные технологические схемы прямых переплавов ломов и отходов различного происхождения.

Разрабатывали технологии синтезирования рабочих сплавов АК9ч [108, 109] и АК12 [110] с целью дальнейшего их использования для получения литой продукции.

В таблице 4.11 приведены составы шихт по 2-м вариантам: с использованием ломов в виде электротехнического алюминия марки А5Е (вариант KI); комплексное использование ломов электротехнического алюминия и банок (вариант

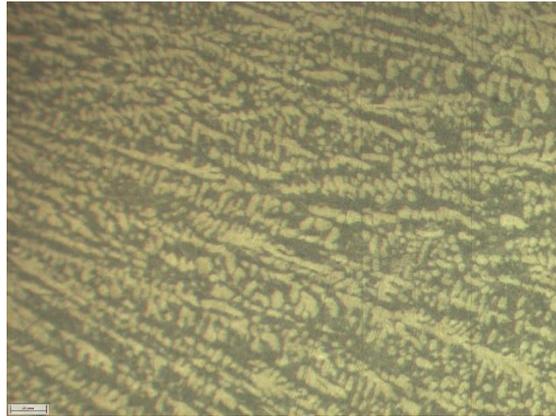
КП). Кремний в обоих случаях вводили в виде микрокристаллической лигатуры AlSi20, полученной с применением электротехнических ломов алюминия и отходов кристаллического кремния в виде фракций 2-6 мм. Лигатурный расплав AlSi20 получали по низкотемпературной технологии [111] с последующей кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе. Суммарная доля отходов по варианту КІ составляла 96%; по варианту КП – 100%. В качестве модификатора по варианту КП использовали микрокристаллический переплав (МКП), полученный заливкой рабочего сплава в специальный кокиль для получения прутков \varnothing 3мм длиной до 200 мм (рис. 4.17). В процессе экспериментов варьировали количеством вводимого МКП 0,5; 1,0; 1,5 % по массе.

Таблица 4.11 - Шихтовые материалы для приготовления рабочего сплава АК9ч

№ п/п	Шихтовые материалы	Вид, характеристика
Вариант КІ (доля отходов в составе шихты 96%)		
1	Алюминий электротехнический марки А5Е	Электротехнические отходы в виде проволоки \varnothing 3-5 мм
2	Магний чушковый Мг90 ГОСТ 804-93	Первичный чушковый магний
3	Лигатура AlMn10 ГОСТ 53777-2010	Чушковая лигатура
4	Лигатура AlSi20 ГОСТ 53777-2010	Микрокристаллическая лигатура в виде ленты толщиной 1,5-2,5 мм
Вариант КП (доля отходов в составе шихты 100%)		
7	Алюминий электротехнический марки А5Е	Электротехнические отходы в виде проволоки \varnothing 3-5 мм
8	Лигатура AlSi20 ГОСТ 53777-2010	Микрокристаллическая лигатура в виде ленты толщиной 1,5-2,5 мм
9	МКП сплава АК9ч	Микрокристаллический переплав сплава АК9ч в виде прутков \varnothing 3 мм
10	Отходы сплава 3104 (Al-Mn-Mg) ГОСТ 54564-2011	Баночный лом



а



б

а – внешний вид; б - микроструктура

Рисунок 4.17 – Микрокристаллический прутковый МКП сплава АК9ч

МКП имеет типично модифицированную микроструктуру: средний размер дендритов α -Al составил 7 мкм; кристаллов кремния эвтектического Si_3 – 5 мкм.

На рисунке 4.18 представлена микроструктура валковой лигатуры AlSi20. Средний размер кристаллов первичного кремния Si_{II} – 22 мкм.

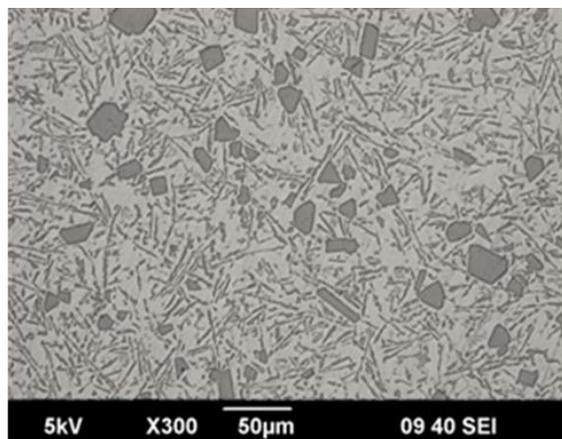


Рисунок 4.18 – Микроструктура валковой лигатуры AlSi20

Шихтовые металлы подогревали при 150-200°C, загружали и расплавляли в определенной последовательности, рафинировали при 700-720°C КФК ОДО «Эвтектика», выдерживали 10 минут, снимали шлак и заливали в плоский стальной кокиль. МВГ составлял 95-97%. На полученных отливках «Пластина» толщиной 15 мм определяли: электропроводность, макроизлом, микроструктуру, химический состав и механические свойства в литом состоянии.

Структура рабочего сплава АК9ч, полученного по 2-м вариантам шихты приведены на рисунке 4.19. Видно, что в обоих случаях изломы (рис. 4.19, а, б) характеризуются мелкокристаллическим строением, отсутствием шлаковых включений и газовых раковин. В чушковом сплаве, полученном по варианту КII, в верхней части чушки имеется концентрированная газоусадочная пористость (рис. 4.19, б).

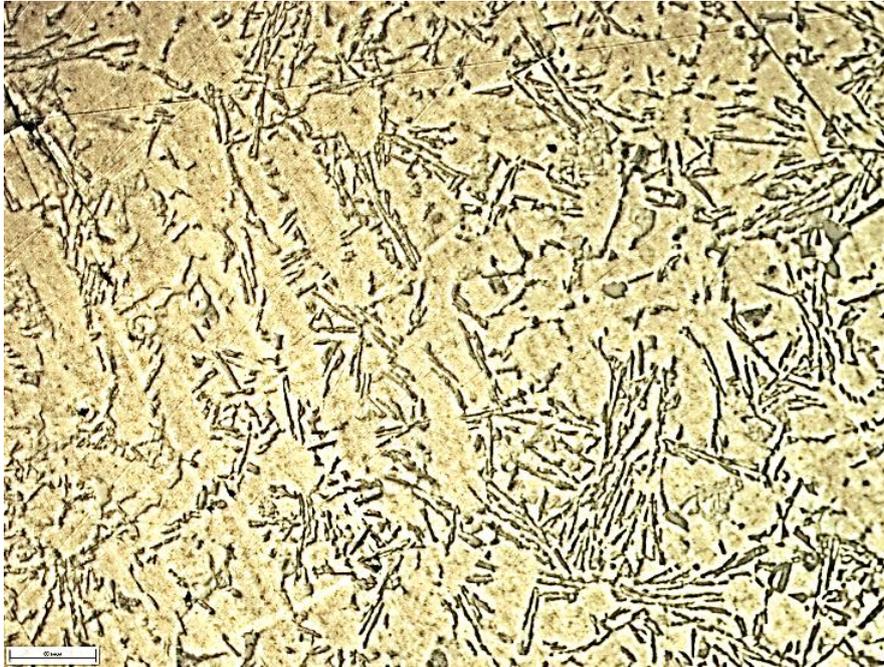
В таблице 4.12 представлены свойства и параметры структуры рабочих сплавов в немодифицированном литом состоянии.



а



б



в



г

а, в – излом и микроструктура сплава по варианту КІ, соответственно;

б, г – излом и микроструктура сплава по варианту КІІ, соответственно

Рисунок 4.19 – Структура чушковых сплавов АК9ч в немодифицированном состоянии

Таблица 4.12 – Свойства и структурные характеристики рабочих сплавов АК9ч

Вариант шихты	Электропроводность γ , МСм/м	Параметры микроструктуры, мкм		[H], см ³ /100 г Ме	ρ , г/см ³	Механические свойства		
		α_{Al}	Si _b			НВ	σ_b , МПа	δ , %
КІ	19,6	21	22	0,30	2,679	71	194,0	2,8
КІІ	19,5	19	20	0,31	2,688	72	194,5	3,0
ГОСТ 1583-93, не менее (кокиль, литое)	-	-	-	-	-	50	147,0	2,0

Химические составы сплавов соответствовали требованиям ГОСТ 1583-93.

Результаты, приведенные в таблице 4.12, показывают, что по обоим вариантам шихты сплавы имеют близкие характеристики. Незначительное снижение значений электропроводности в сплаве по варианту КІІ может быть обусловлено повышенным содержанием водорода по сравнению со сплавом, полученным по варианту КІ.

Таким, образом, эксперименты показали, что можно получать рабочий сплав АК9ч с использованием в составе шихты до 100% деформированных отходов с гарантированным запасом механических свойств над требованиями ГОСТ 1583-93.

Далее исследовали влияние МКП на свойства сплава АК9ч в литом состоянии по варианту шихты КІІ (табл. 4.13). Видно, что с увеличением доли МКП растут структурно-чувствительные свойства электропроводность и плотность, достигая максимуму при введении 1,5% МКП. Предел прочности при растяжении и относительное удлинение также имеют максимальные значения при 1,5% МКП. Причем, значения предела прочности на 40%, а относительное удлинение в 2,35 раза выше над минимально допустимыми значениями по ГОСТ 1583-93.

Таблица 4.13- Влияние МКП на механические и физические свойства и электропроводность рабочего сплава АК9ч

Количество МКП, %	Механические свойства		Электропроводность γ , МСм/м	ρ , г/см ³
	σ_b , МПа	δ , %		
0	194,5	3,0	19,5	2,688
0,5	198,9	3,2	20,1	2,692
1,0	203,8	4,0	22,2	2,693
1,5	205,8	4,7	23,4	2,695
ГОСТ 1583-93, не менее (кокиль, литое)	147,0	2,0	-	-

Сопоставление полученных результатов с результатами модифицирования сплава АК9ч добавками лигатуры AlSr10 (п. 4.2) показывает, что МКП оказывает практически такое же модифицирующее действие, как и лигатура. С учетом того, что МКП получают кристаллизацией части рабочего сплава с повышенными скоростями охлаждения, такой способ модифицирования можно отнести к разряду экономного модифицирования.

Сплав АК12 синтезировали с использованием лома бутылок (АД0) и банок (3104) из-под напитков, применяя в качестве основы микрокристаллическую лигатуру AlSi20 по технологической схеме, представленной на рисунке 4.20 [110].



Рисунок 4.20 – Технологическая схема синтезирования сплава АК12

Предварительно расплавляли навеску лигатуры AlSi20. Затем нагревали расплав до $T_p=650-680$ °С и осуществляли ввод деформированных шихтовых ма-

териалов (лом бутылок и банок) в твердо-жидкий расплав. Низкая температура ввода была выбрана с целью снижения угара и окисления ломов из-за присутствия на их поверхности специальных покрытий (лак, краска). Деформированную шихту вводили под зеркало вязкого расплава с замешиванием. Для рафинирования использовали КФК «ЭВТЕКТИКА» (г. Минск) в количестве 5% сверх массы плавки. МВГ при такой технологической схеме составил 93%. Суммарно (с учетом лигатуры) в составе шихты было задействовано до 82% деформированных отходов. Химический состав сплава соответствовал требованиям ГОСТ 1583-93. Механические свойства представлены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Механические свойства синтезированного сплава АК12

Вид сплава	Механические свойства			
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\delta\%$	НВ
Синтезированный	171,3	100,8	4,5	61
По ГОСТ 1583-93, не менее, (кокиль, литое)	157,0	-	2,0	50

Видно, что синтезированный сплав АК12 имеет гарантированный запас по механическим свойствам над минимальными требованиями ГОСТ 1583-93.

Отрабатывали технологию получения рабочего сплава АМгбл с максимальной долей деформированных отходов в составе шихты (92,5%) [112]. Составы шихт и химические составы сплавов представлены в таблице 4.15.

Применение до 92,5% деформированных отходов (вариант Б) не привело к нарушению требований ГОСТ 4784-2019 по химическому составу. Замена чушкового алюминия на мелкокристаллический деформированный электротехнический лом, даже при несколько меньших концентрациях Mg и Ti и повышенном содержании Fe, обеспечила гарантированный запас значений механических свойств над минимальными требованиями ГОСТ 1583-93 (табл. 4.16), а также более высокие значения по сравнению со сплавом, полученным из первичных шихтовых материалов (вариант А). Некоторое повышение механических свойств сплава хорошо коррелирует с изменением электропроводности и объясняется сохранением положительного наследственного влияния структуры деформированных отходов.

Применение таких отходов привело, прежде всего, к уменьшению в структуре сплава размеров β -фазы (Al_3Mg_2) на ~10%.

Таблица 4.15 - Составы шихты и химические составы литого сплава АМгбл

Варианты состава шихты	Виды и количество шихтовых материалов (%)	Состав, %					
		Легирующие элементы				Примеси, не более	
		Mg	Mn	Ti	Be	Fe	Si
А (чушковые ШМ - 100%)	Чушковый А7 (92,5) Чушковый Мг95 (6,8) Чушковая лигатура AlMn10 (0,64Mn) Чушковая лигатура AlTi4 (0,1Ti) Чушковая лигатура AlBe3 (0,003Be)	7,0	0,60	0,092	0,015	0,07	0,032
Б (деформируемые отходы 92,5%)	Чушковый Мг95 (6,8) Лом электротехнический А5 (91,5) Отходы деформированного АМг5 (1,0) Чушковые лигатуры как в варианте А	6,43	0,5	0,08	0,014	0,2	0,18
По ГОСТ 1583-93		6,0-7,0	-	0,05-0,15	0,02-0,10	0,2	0,20

Таблица 4.16 - Физико-механические свойства литого сплава АМгбл

Вариант состава шихты	σ_b , МПа	δ , %	НВ	Электропроводность, МСм/м
А	280	13,5	89,7	11,4
Б	292	11,5	89,7	12,0
ГОСТ 1583-93, не менее (кокиль литое)	216	6,0	60,0	-

Результаты выполненных экспериментов на сплавах АК9ч, АК12, АМгбл показали, что по оптимальным технологическим схемам возможно получение рабочих сплавов, соответствующих требованиям ГОСТ1583-93 по химическому составу, с максимальным (80-100%) вовлечением в составы шихт деформированных ломов и отходов (Д-шихта). При этом, сплавы характеризуются измельченными параметрами основных структурных фаз и, как следствие, повышенными механи-

ческими свойствами по сравнению с минимально допустимыми значениями ГОСТ 1583-93. Дополнительным резервом повышения качества рабочих сплавов, получаемых с максимальным использованием отходов в составе шихты, является экономное модифицирование добавками микрокристаллического переплава в количестве не более 1,5% по массе.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Синтезирование сплавов АК7ч, АК12, АК6М2 и АМг5 с использованием отходов в виде стружек и баночных ломов подтвердили адекватность разработанных дополнительных критериев качества деформированных ломов (Д-шихта). Наименьшим металлургическим выходом годного (82%), худшим сочетанием физико-механических свойств характеризовался сплав АК12, синтезированный на основе баночных ломов, которым по совокупности разработанных критериев был присвоен 4-5 балл из 10.

2. Высокие МВГ были получены при синтезировании сплава АК6М2 (94%) и АМг5 (96%), в составы шихт которых входила вьюнообразная стружка деформируемых сплавов Д16 и АМг6.

3. Дополнительным резервом повышения качества синтезируемых сплавов является использование электротехнических ломов алюминия и модифицирование.

4. Холодная прокатка деформируемого сплава АМг5, синтезированного из вьюнообразной стружки показала, что немодифицированный сплав выдерживает 10 проходов до начала растрескивания; модифицированный – 12 проходов. Максимальная степень деформации для немодифицированного сплава составила – 60,5%; для модифицированного – 67,2%.

5. Установлено, что вовлечение в состав шихты деформированных ломов при получении рабочих сплавов АК9ч и АМг6л обуславливает повышение эффективности модифицирования при меньших количествах вводимых лигатур AlSr (для сплава АК9ч) и AlTi (для сплава АМг6л). Использование в составе шихты деформированных ломов (баночные лома для сплава АК9ч; пластины для АМг6л) обуславливает формирование измельченной микро- и макроструктуры рабочих сплавов, а также повышенных механических свойств по сравнению со сплавами, приготовленных с использованием литого возврата собственного производства в виде прибыльных частей литниково-питающих систем.

6. Получена закономерность, показывающая влияние Д-шихты и содержания водорода на плотность сплавов в жидком состоянии. Меньшим газосодержанием

и повышенной плотностью характеризовались расплавы, полученные с применением Д-шихты.

7. Установленные эффекты при использовании Д-шихты объяснены с позиции явления структурной наследственности.

8. Результаты выполненных экспериментов на сплавах АК9ч, АК12, АМгбл показали, что по оптимальным технологическим схемам возможно получение рабочих сплавов, соответствующих требованиям ГОСТ1583-93 по химическому составу, с максимальным (80-100%) вовлечением в составы шихт деформированных ломов. При этом, сплавы характеризуются измельченными параметрами основных структурных фаз и, как следствие, повышенными механическими свойствами.

9. Дополнительным резервом повышения качества рабочих сплавов, получаемых с максимальным использованием отходов в составе шихты, является экономное модифицирование добавками микрокристаллического переплава в количестве не более 1,5% по массе.

5 ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1 Разработка технологии изготовления припойного сплава системы Al-Cu-Si на основе рециклируемых отходов

Пайкой называют образование соединения с межатомными связями путем нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления, их смачивания припоем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизацией [114]. Пайка, как и сварка, относится к неразъемным соединениям, но при пайке соединение элементов основного материала происходит за счет расплавления и кристаллизации припоя, температура плавления которого ниже, чем температура плавления основного материала. Несмотря на то, что пайка, как и сварка, является неразъемным соединением, во многих случаях (например, когда необходимо заменить вышедший из строя элемент, деталь или узел паяного соединения) можно произвести распайку соединения, устранение дефектов и осуществить повторную пайку.

По температуре плавления различают припои для низкотемпературной пайки (особо легкоплавкие – менее 145 °С, легкоплавкие – от 145 до 450 °С) и высокотемпературной пайки (среднеплавкие – от 450 до 1100 °С, высокоплавкие – от 1100 до 1850 °С, тугоплавкие – свыше 1850 °С) [115].

Пайка широко применяется при изготовлении различных изделий из алюминиевых сплавов (сотовые панели, радиаторы различных систем охлаждения, оболочки ТВЭЛ реакторов, вакуумные приборы), а также для ремонта деталей автомобильного назначения, где требуется обеспечение герметичности.

Согласно [116], соединение заготовок из алюминиевых сплавов пайкой можно осуществлять низкотемпературными и высокотемпературными припоями.

К наиболее перспективным припоям для высокотемпературной пайки можно отнести припой системы Al-Cu-Si марки А34 (табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Характеристика припоя марки А34 [116]

Химический состав, % (Al – ост.)			Механические свойства		Температура, °С	
Cu	Si	Σ примесей, не более	σ _в , МПа	δ, %	T _L /T _S	Пайки
27,0-29,0	5,5-6,5	0,8	180-240	1,0	525/525	530-550

В работах [117-119] исследовали влияние условий приготовления на структуру и свойства припоя А34. Было показано, например, что высокотемпературная обработка расплава обеспечивает получение модифицированной структуры литого припоя, уменьшение размеров кристаллов Si_п [117-118]. Получение литого припоя с повышенными скоростями охлаждения также способствует обеспечению мелкокристаллического строения и повышения технологических свойств припоя [119].

В настоящее время в РФ отсутствуют централизованные производства литого припоя А34 в виде прутков. По требованиям заказчика (ЗАО ПФ «Плавка и пайка», г. Москва) необходимо было организовать производство литых прутковых припоев А34, обладающих следующими характеристиками (табл. 5.2).

Таблица 5.2 – Требования к сплаву и припою А34

К сплаву				К припою	
T _L /T _S , °С	Размер Si _п , мкм (не более)	Механические свойства, не менее		Габариты (d×l), мм	Дополнительные
		σ _в , МПа	δ, %		
525/525 (±1°С)	10	240	1,5	4,5×200	Возможность сварки
				3,0×400	

По аналогии с литьем припой можно считать шихтовой заготовкой или предварительным сплавом функционального назначения. следовательно для получения припойного сплава можно использовать основные закономерности структурной наследственности.

В таблице 5.3 приведены шихтовые материалы, использованные для приготовления припойного сплава А34.

Таблица 5.3 – Шихтовые материалы для получения припойного сплава марки А34

№ п/п	Шихтовые материалы	Вид, характеристика
1	Лом алюминия электротехнический марки А5 ГОСТ 54564-2011	Электротехнические отходы в виде проволоки \varnothing 3-5 мм
2	Лом меди электротехнический марки М1 ГОСТ 54564-2011	Электротехнические отходы в виде шины толщиной 3-5 мм
3	Стружка Д16 ГОСТ 54564-2011	Витая стружка, образующаяся при механической обработке деформированных полуфабрикатов
4	Синтезированный сплав АК12	Технологическая схема – рис. 4.20 Получен кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе
5	Микрокристаллический переплав (МКП) А34	Часть рабочего сплава, закристаллизованного в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе

На рисунке 5.1 представлена технологическая схема получения литого припоя в виде прутка. После расплавления навески электротехнического лома алюминия при температуре расплава 780°C порционно вводили электротехнический лом меди. После расплавления медного лома, при температуре расплава $710-720^{\circ}\text{C}$ вводили синтезированный сплав АК12, который использовался в качестве лигатуры, для обеспечения требуемого содержания кремния. Далее производили добавление предварительно подготовленной стружки Д16. Рафинирование проводили при $730\div 750^{\circ}\text{C}$ гранулированным флюсом «Cristall 2000» (Италия) из расчета 0,5 мас.%, осуществляли технологическую выдержку в течение 20 мин, снимали шлак и перемешивали расплав для обеспечения однородности химического состава по объему тигля. Часть расплава заливали в водоохлаждаемый валковый кристаллизатор, получая МКП А34 в виде ленты толщиной 1,5-2,0 мм. Основную часть расплава разливали в чугунные окрашенные изложницы, получая предварительный сплав А34 в виде чушек толщиной 20-25 мм.

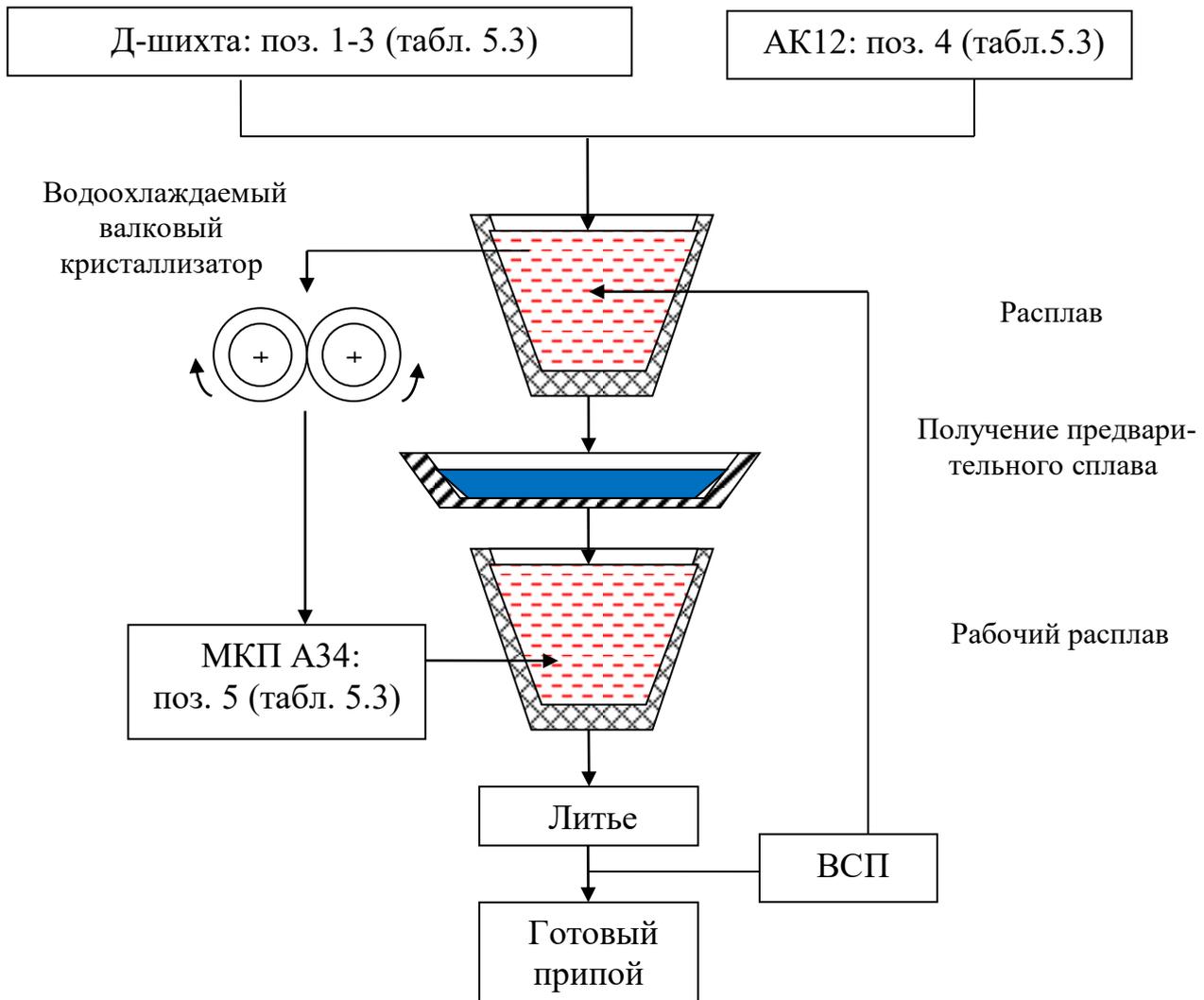


Рисунок 5.1 - Технологическая схема получения микрокристаллического припоя А34:

МКП - микрокристаллический переплав;

ВСП – возврат собственного производства

Предварительный чушковый сплав использовали для получения рабочего сплава А34. За 10 мин до начала литья осуществляли модифицирование добавкой МКП А34 в количестве 0,5-1,0% по массе.

Оценку кинетики затвердевания и плавления исходных припойных сплавов проводили в следующем порядке:

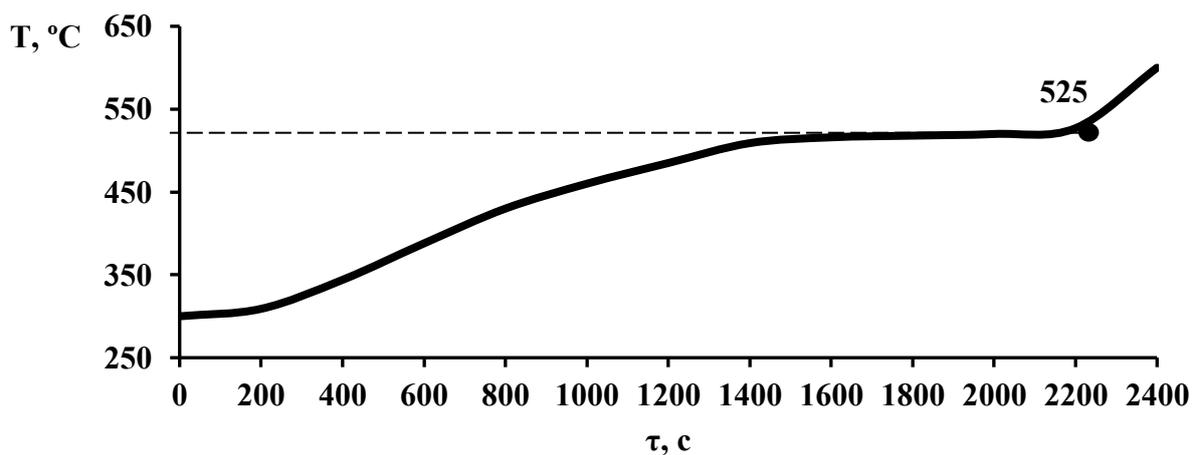
1. Нагрев расплава массой 0,2 кг в печи сопротивления до 600 °С.
2. Изотермическая выдержка в течении 15 мин для выравнивания температуры расплава по всему объему.

3. Отключение печи, естественное охлаждение расплава вместе с печью до 300 °С. В процессе охлаждения оценивали кинетику затвердевания.

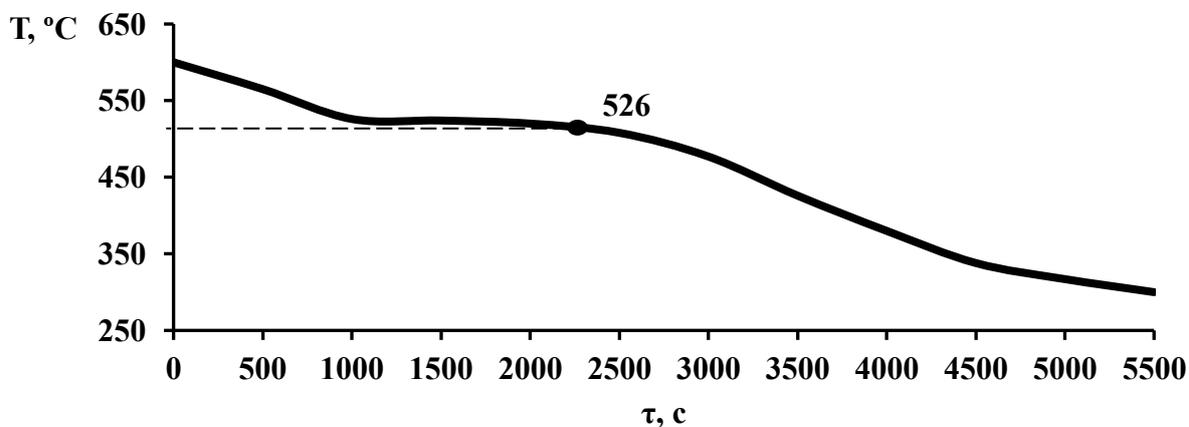
4. Повторный нагрев печи до температуры 600 °С. В процессе нагрева оценивали кинетику плавления.

5. Контроль температуры в ходе экспериментов осуществляли гибкими термопарами типа ХА (диаметр горячего спая – 1,2 мм, класс допуска – 1). Горячий спай был погружен в термический центр образца, находящегося в тигле; холодный спай подключали к многоканальному видеографическому регистрирующему преобразователю Ш9329А «Сенсорика». Показания температур в процессах нагрева и охлаждения снимали с шагом 7 с.

На рисунке 5.2 представлены результаты определения кинетики плавления и затвердевания рабочего сплава А34.



а

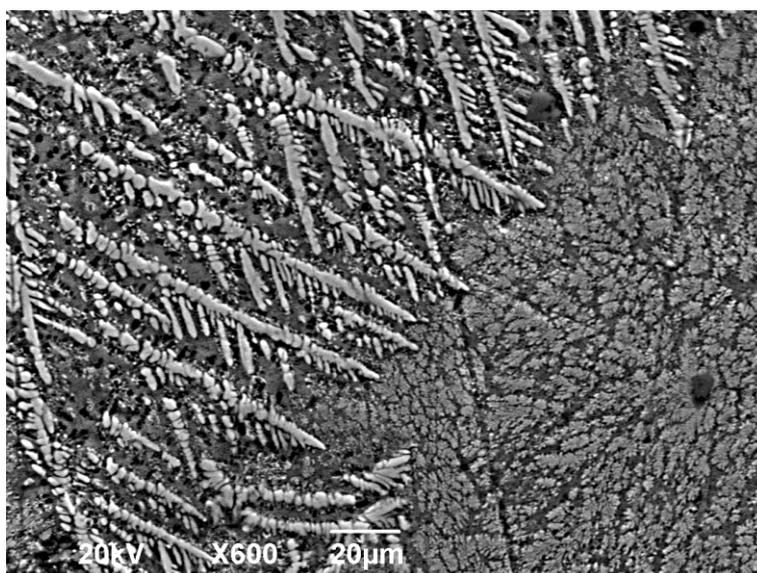


б

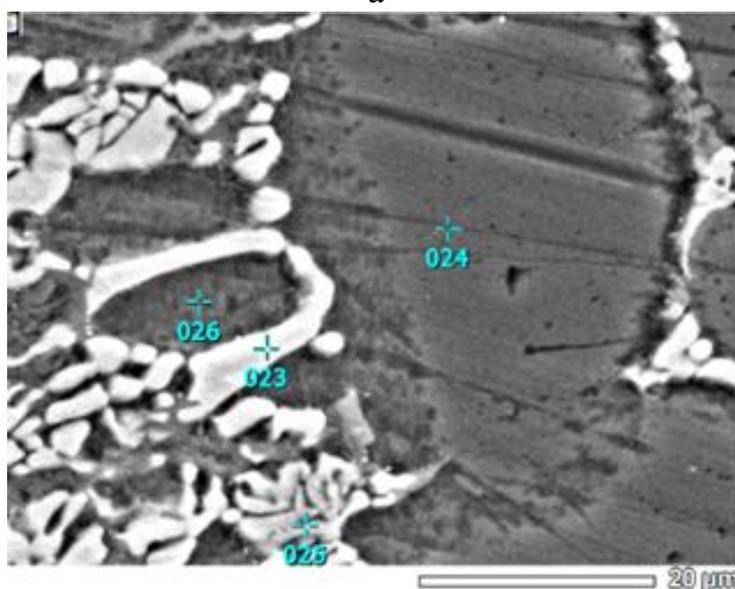
Рисунок 5.2 – Кинетика плавления (а) и затвердевания (б) сплава А34

Из рисунка 5.2 видно, что температуру ликвидуса и солидуса соответствуют требованиям заказчика.

В структуре припоя А34 в виде прутка присутствуют многочисленные мелкодисперсные включения фазы CuAl_2 , многофазная эвтектика ($\text{Al} + \text{Si} + \text{CuAl}_2$) имеет мелкокристаллическое строение и равномерно распределена между дендритами алюминия, выделения кристаллов первичного кремния Si_Π отсутствуют (рис. 5.3).



а



б

а – увеличение $\times 600$ крат; б – точки микрорентгенспектрального анализа

Рисунок 5.3 – Микроструктура пруткового припоя А34

Результаты МРСА (рис. 5.3, б; табл.5.4) подтверждают, что в структуре припоя имеются фазы CuAl_2 (точки 023 и 026) неравновесного состава; тройная эвтектика ($\text{Al} + \text{Si} + \text{CuAl}_2$) (точка 025); дендриты твердого раствора на основе алюминия (точка 024).

Таблица 5.4 – Распределение элементов в прутковом припое А34

Номер точки замера	Содержание элементов в сварном шве, %		
	Al	Si	Cu
023	47,44	1,18	51,38
024	98,74	0,80	0,46
025	76,82	13,74	9,44
026	83,63	0,96	15,41

Результаты кинетики плавления и затвердевания, анализ химического состава и микроструктуры, механических испытаний и плотности показал, что припой марки А34, полученный по разработанной технологической схеме, полностью соответствуют требованиям ОСТ 4Г 0.033.200 [116] и заказчика (табл. 5.5).

Таблица 5.5 – Физико-механические свойства припойного сплава А34

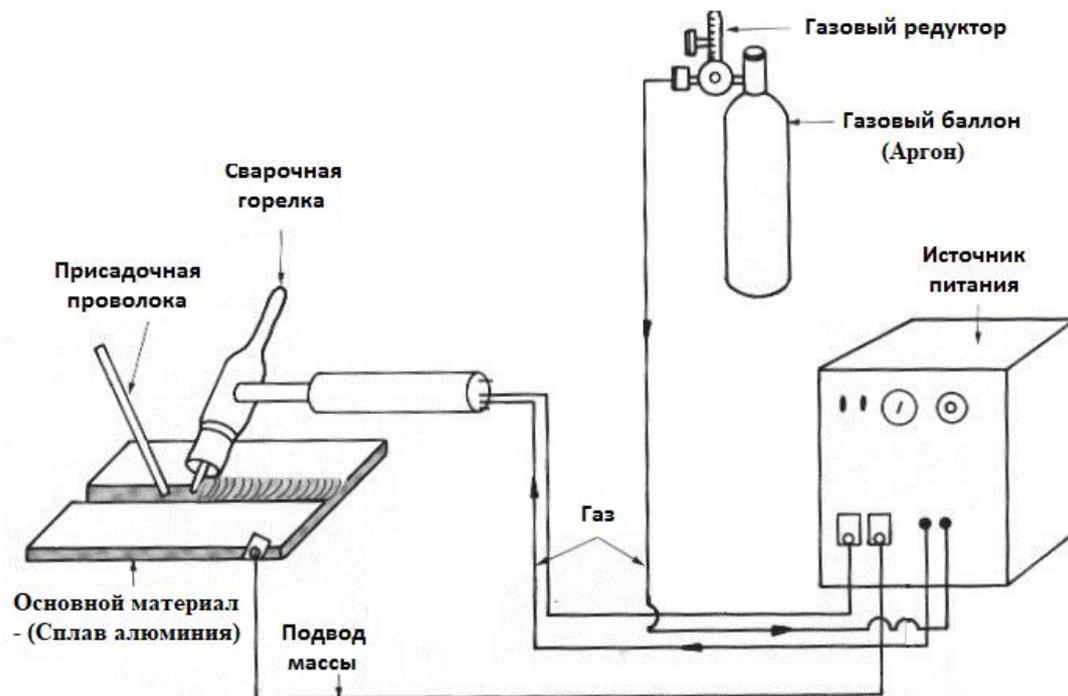
T_L/T_s , °C	Размер S_{ip} , мкм (не более)	Механические свойства, не менее		Плотность, г/см ³	
		σ_b , МПа	δ , %	ρ_L	ρ_S
525/526	Отсутствуют	252	1,5	3,04	3,32*

*Плотность в твердом состоянии 3,3 г/см³ [116]

Далее оценили возможность применения припоя марки А34 в качестве присадочного материала при сварке. Сварку производили на установке аргонодуговой сварки Транс-ТИГ-350 (рис. 5.4), которая предназначена для аргонодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом в среде инертных газов (режим ТИГ).

Оценивали возможность сварки пластин (толщина 2 мм) из алюминиевых сплавов АК7ч (литейный) и АМг5 (деформируемый). В качестве газовой защит-

ной среды использовался аргон. Подача аргона начиналась за 5–7 с до возбуждения дуги, а выключалась через 5–7 с после ее обрыва.



а



б

а – схема; б – общий вид

Рисунок 5.4 – Установка Транс-ТИГ-350

Перед сваркой поверхность заготовок была тщательно очищена стальными проволочными щетками.

Сварку заготовок производили «в стык», без разделки кромок, с двухсторонним проваром (рис. 5.5).

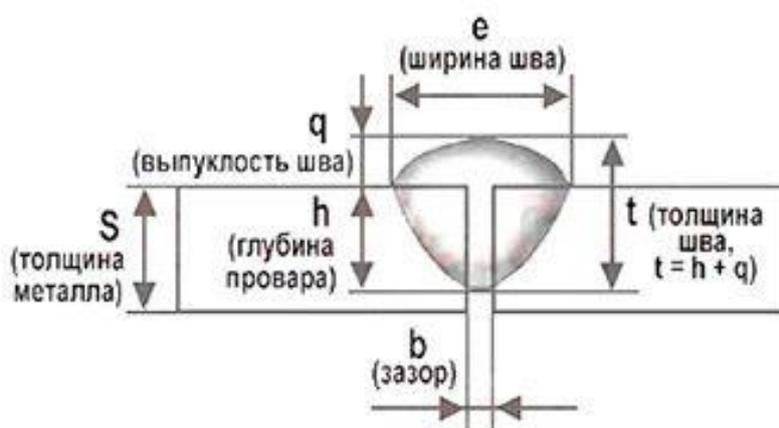
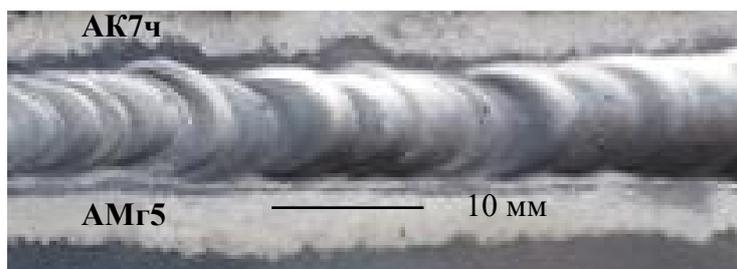


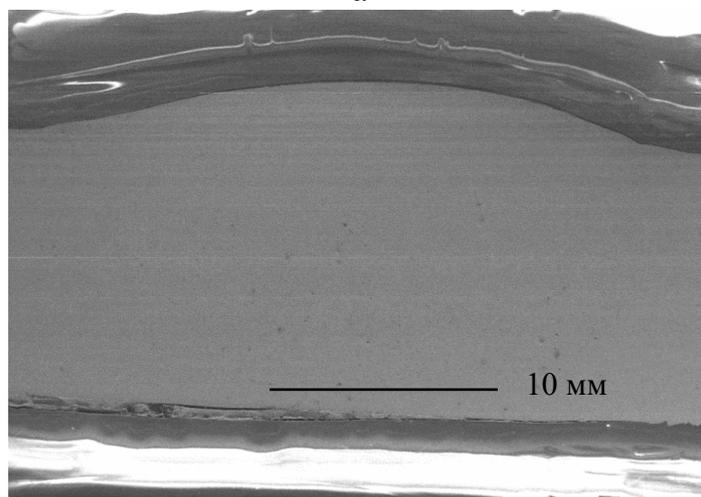
Рисунок 5.5 – Схема сварки заготовок из алюминиевых сплавов

На первом этапе оценили влияние силы тока на (50, 70, 90 А) на качество сварных швов при сварке однородных материалов. Было установлено, что при силе тока 90А присадочные материал растекается по заготовкам, а в структуре сварного шва образуется большое количество пор. Кроме того, при сварке пластин из сплава АМг5 при силе тока 90А отмечался прожег соединяемых заготовок. При силе тока 50А в сварных соединениях присутствовал дефект «непровар». Исходя из этого, сварку «АК7ч-АМг5» проводили при силе тока 70 А.

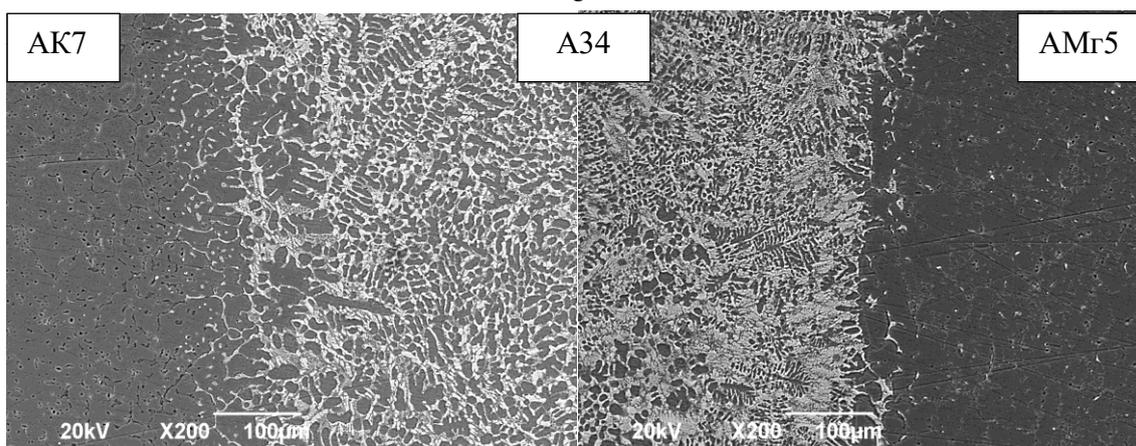
При указанной силе тока формировался ровный сварной шов (рис. 5.6, а), в структуре которого отсутствовали дефекты в виде пор и «непровар» (рис. 5.6, б, в).



а



б



в

а – сварной шов; б – макроструктура сварного шва; в – микроструктура сварного шва
 Рисунок 5.6 – Сварной шов «АК7ч-АМг5», сформированный припоем А34 в качестве
 присадочного материала

В результате выполненных исследований установлено, что качество литого припоя марки А34, получаемого по разработанной технологической схеме, в полной мере соответствует требованиям ОСТ 4Г 0.033.200 [116] и заказчика. Кроме того, данный припой можно использовать в качестве присадочного материала при сварке разнородных алюминиевых сплавов.

Разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-11 «Изготовление мелкокристаллического пруткового припоя А34» (Приложение В).

За период февраль 2022 г. по май 2023 г. было изготовлено и поставлено заказчику 1500 кг микрокристаллического припоя марки А34 (Приложение Г).

5.2 Разработка технологии и изготовление отливок из синтезированного сплава АК7ч литьем по выплавляемым моделям

По заказу АО «Авиаагрегат» (г. Самара) по предоставленным чертежам деталей необходимо было освоить производство отливок из сплава АК7ч. Программа включала в себя 30 позиций деталей. Общее количество отливок – 150 шт. Данная работа была отнесена к работе полного цикла, включающая в себя проектирование, моделирование, получение сплава, изготовление модельной оснастки и литейных форм, литье.

Для выполнения данного заказа в Центре литейных технологий ФГБОУ ВО СамГТУ была разработана технология изготовления отливок из синтезированного сплава АК7ч способом литья по выплавляемым моделям.

Предварительный сплав АК7ч в виде чушки получали по разработанной и опробованной технологической схеме (п. 4.1). Состав шихты для получения предварительного сплава приведен в таблице 5.6.

Приготовление рабочего сплава АК7ч производили в электрической печи сопротивления в графитовом тигле емкостью 30 кг по алюминию. После расплавления предварительного сплава при температуре 720-740 °С производили рафинирование расплава КФК в количестве 0,3% от массы плавки.

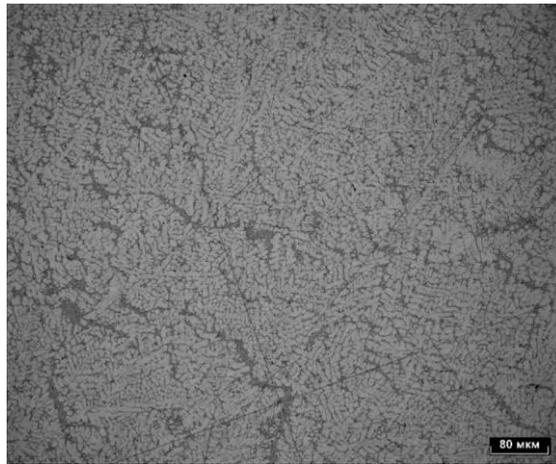
С учетом невысоких скоростей охлаждения сплавов, характерных для литья по выплавляемым моделям, с целью обеспечения гарантированного запаса механических свойств в процессе приготовления рабочего сплава АК7ч применяли экономное модифицирование добавками комплексного микрокристаллического переплава (КМКП) с повышенным содержанием титана (АК7ч+0,5%Ti). КМКП вводили в расплав непосредственно перед началом литья. Микроструктуры

КМКП АК7ч+0,5%Ti и рабочего сплава после модифицирования представлены на рисунке 5.7. Видно, что КМКП оказывает сильное модифицирующее воздействие на структурные составляющие рабочего сплава.

Таблица 5.6 - Шихтовые материалы для приготовления предварительного сплава АК7ч

№ п/п	Шихтовые материалы	Вид, характеристика
1	Алюминий электротехнический марки А5Е	Электротехнические отходы в виде проволоки \varnothing 3-5 мм
2	Предварительный сплав АК9ч	Технологическая схема рис. 3.10 Получен кристаллизацией в изложнице
3	Предварительный сплав АМг6	Технологическая схема рис. 3.12 Получен кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе
4	Комплексный микрокристаллический переплав (АК7ч+0,5%Ti)	Микрокристаллическая лигатура для модифицирования структуры, полученная кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе

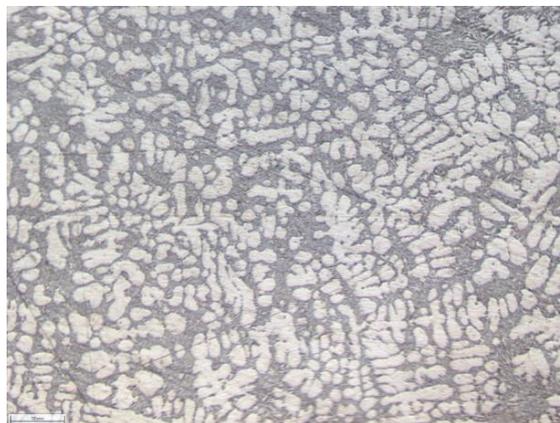
С целью получения объективных результатов по механическим свойствам, отдельно отлитые образцы получали литьем в огнеупорные керамические формы. Была разработана конструкция модельного блока для одновременного получения 4-х отдельно отлитых образцов (рис. 5.8). Модельный блок имеет центральный стояк, модели образцов расположены по обе стороны от стояка по две штуки. Заполнение и питание отливок осуществляется снизу. В верхней части отливок предусмотрены выпора, выходящие в общую чашу. Данная конструкция модельного блока обеспечивает ламинарное заполнение огнеупорной керамической формы и направленное затвердевание сплава в процессе кристаллизации. Для изготовления восковых моделей был использован модельный состав марки Wax Allround. Запрессовку проводили в силиконовую форму с помощью воскового инжектора марки LOGIMEC 1500D с ручным насосом при температуре модельного состава 70°C, давление в инжекторе составляло 0,5 бар, охлаждение формы проводилось в воде, время выдержки 15-20 минут.



а



б



в

Рисунок 5.7 – Микроструктура КМКП АК7ч+0,5%Ti (а) и сплава АК7ч до и после модифицирования (б, в)

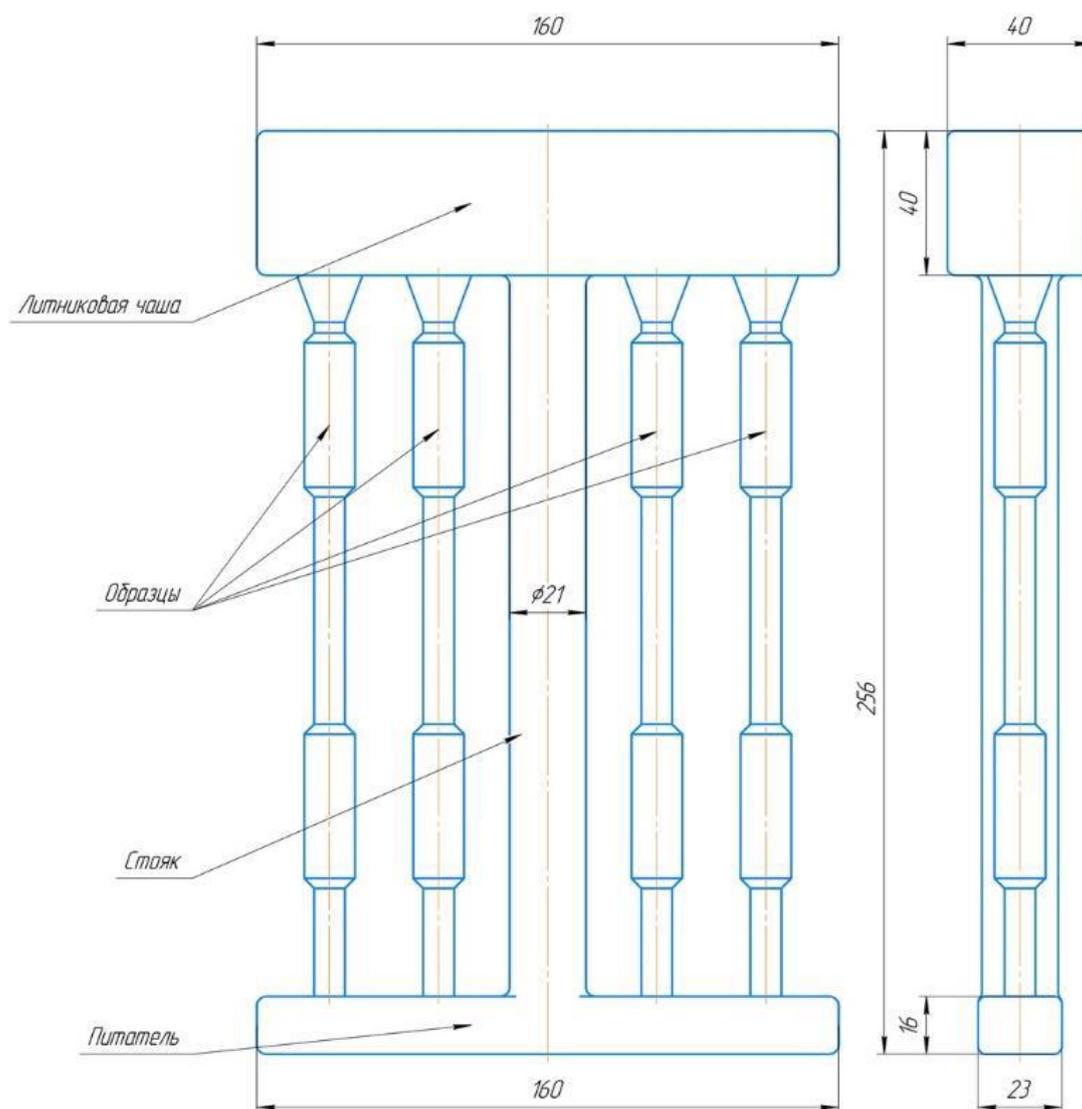


Рисунок 5.8 – Схема модельного блока для получения отдельно отлитых образцов литьем по выплавляемым моделям

В процессе приготовления керамической формы на модельный блок было нанесено 9 слоев, общая толщина формы составила 6 мм. Первые два слоя наносятся плавненным кварцем фракцией 0,125-0,25 мм. А остальные слои фракцией 0,4-0,6 мм. Между каждым нанесением плавленного кварца происходит нанесение суспензии. Каждый слой сушится в течении 3 часов. Суспензия состоит из водного связующего Ставроформ ВС и пылевидного плавленного кварца состав 50/50. Вязкость связующего первого слоя – 55-45 с, второго – 45-35 с, всех последующих 35-25 с.

Выплавление модельного состава из огнеупорной керамической формы проводилось в ванне вытопки модельного состава модели КПЭМ-100/9Т. Далее керамическую форму прокаливали в течение 3 ч в прокалочной печи модели ПС 51.41.52. при 900 °С. Готовая керамическая форма к заливке приведена на рисунке 5.9.

В связи с тем, что отливки подвергаются термической обработке по режиму Т5, механические свойства на отдельно отлитых образцах тоже определялись в термообработанном состоянии.



Рисунок 5.9 – Огнеупорная керамическая форма для получения отдельно отлитых образцов на механические испытания

В таблице 5.7 приведены результаты химического состава рабочего сплава АК7ч.

Таблица 5.7 - Химический состав рабочего сплава АК7ч

Марка материала	Массовая доля, %						
	Основные легирующие		примесей, не более				
	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Ti	Be
АК7ч*	<u>7,1</u>	<u>0,25</u>	<u>0,43</u>	<u>0,34</u>	<u>0,35</u>	<u>0,008</u>	<u>0,0005</u>
	7,6	0,31	0,48	0,41	0,40	0,01	0,0006
ГОСТ 1583-93	6,0-8,0	0,2-0,4	0,5	0,5	0,5	0,15	0,1

*В числителе – минимум; в знаменателе – максимум. По результатам 20 плавков

Видно, что содержание основных легирующих и примесных элементов рабочего сплава АК7ч полностью соответствует требованиям ГОСТ 1583-93. Кроме того, разброс значений по 20-ти выполненным плавкам незначительный, что свидетельствует о стабильности разработанной технологической схемы приготовления сплава.

В таблице 5.8 представлены результаты металлографического анализа и определения физико-механических свойств рабочего сплава АК7ч (по 20-ти плавкам).

Таблица 5.8 – Параметры микроструктуры и физико-механические свойства рабочего сплава АК7ч

Параметры микроструктуры, мкм (min-max)		ρ_s , г/см ³ (min-max)	Механические свойства (Т5)*		
α -Al	Si ₃		σ_b , МПа	δ , %	НВ
<u>13,2</u>	<u>10,2</u>	<u>2,676</u>	<u>264,6-313,1</u>	<u>2,8-3,7</u>	<u>81-88</u>
15,1	17,2	2,683	>196	>2,0	>60

*В числителе – минимум-максимум; в знаменателе по ГОСТ 1583-93

Из представленных результатов видно, что рабочий сплав характеризуется стабильностью структуры и физико-механическими свойствами.

Разрабатывали технологию получения отливок заданной номенклатуры из сплава АК7ч. Для подготовки производства были выполнены следующие работы:

- разработаны чертежи отливок и литниково-питающих систем (ЛПС), адекватность которых проверяли с использованием САМ ЛП LVMFlow;

- полимерные модели отливок и элементов ЛПС получали средствами аддитивного производства по FDM-технологии на отечественных машинах АП Designer XL;

- контроль геометрических размеров полученных моделей осуществляли средствами реверс-инжиниринга с помощью 3D-сканера RengeVisionSpectrum.

Далее на примере отливок-представителей представлены результаты по их получению. На рисунках 5.10, 5.11 приведены чертежи деталей-представителей.

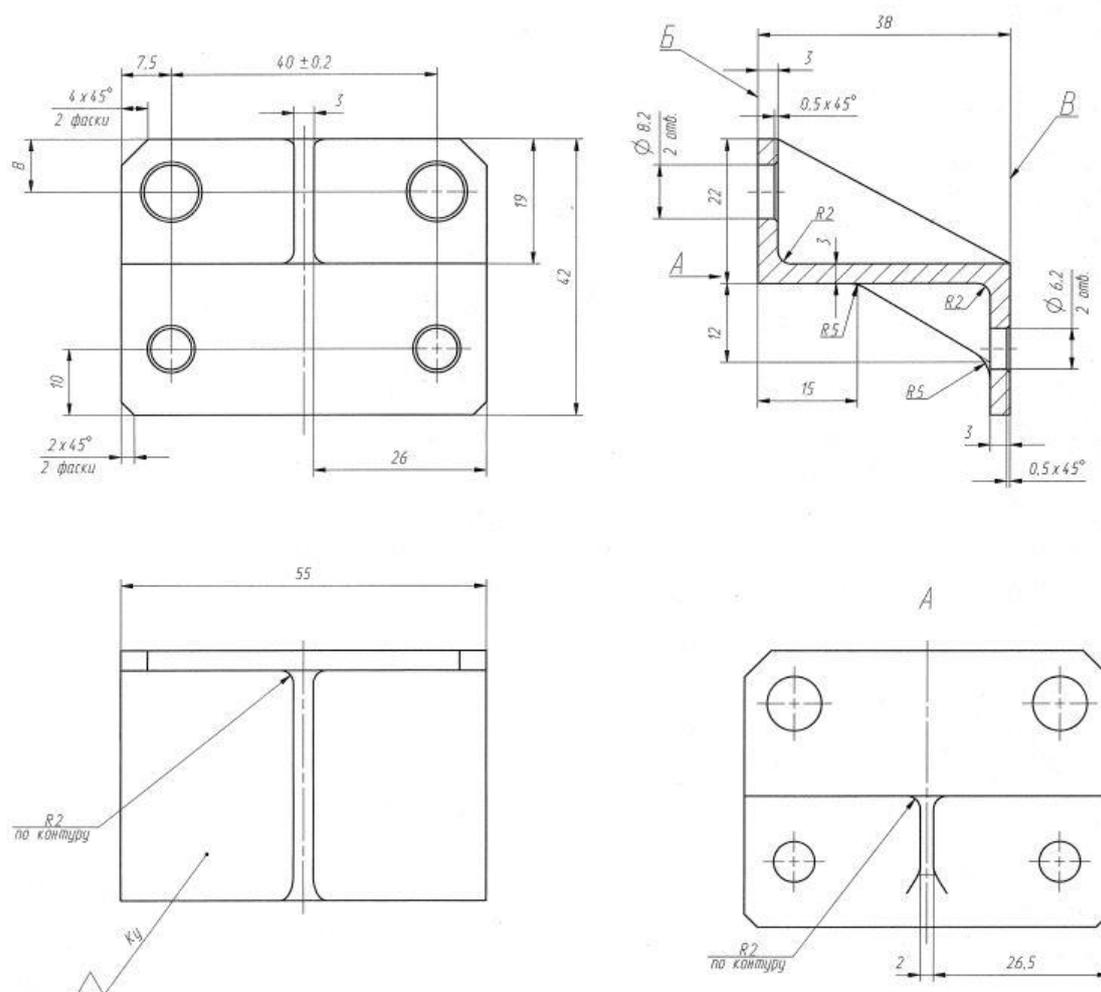


Рисунок 5.10 – Чертеж детали «Кронштейн 00.4201.252»

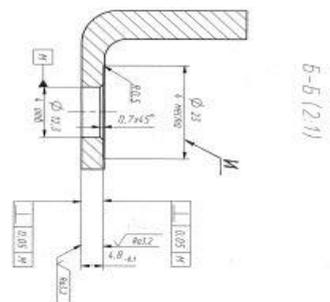
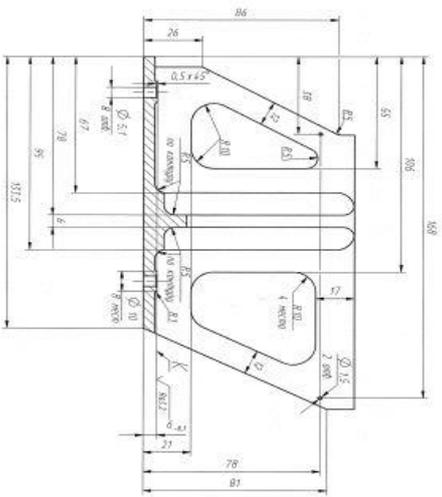
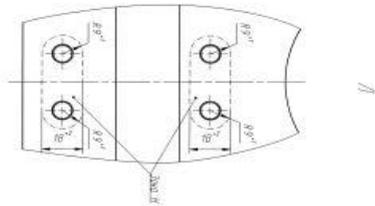
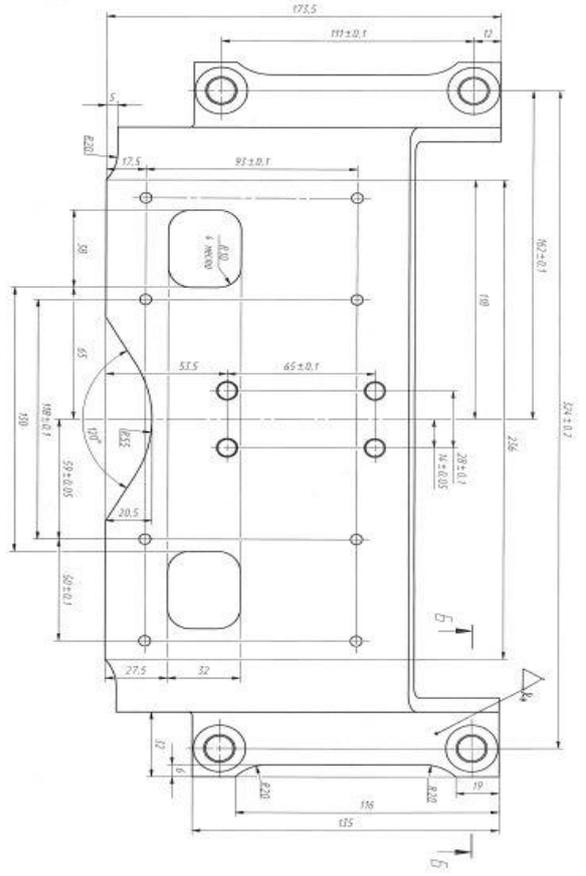
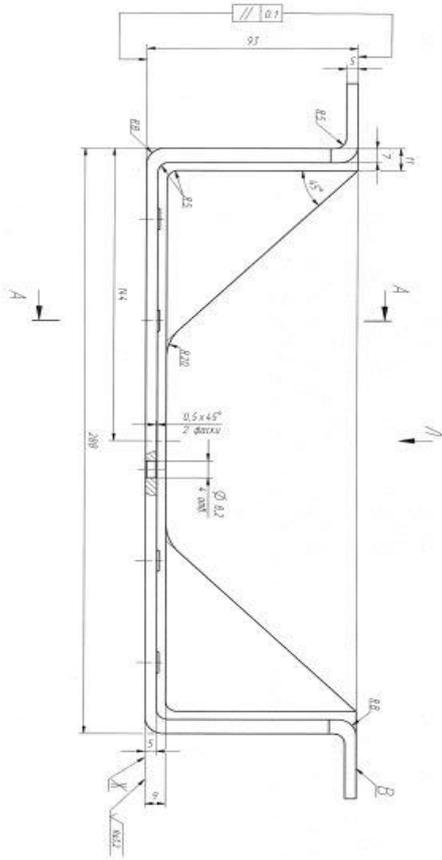


Рисунок 5.11 – Чертеж детали «Кронштейн 00.4201.212»

Деталь «Кронштейн 00.4101.252» представляет собой крепежный элемент Z-образной формы (рис. 5.10). Для обеспечения прочности и жесткости конструкции предусмотрены ребра жесткости толщиной 3,0 мм, соединяющие горизонтальные и вертикальные поверхности. Основные габаритные размеры: 42,4 × 41,4 × 55,5 мм. Деталь имеет равномерную толщину 4,55 мм, масса детали составляет 0,05 кг.

Деталь «Кронштейн 00.4201.212» (рис. 5.11) представляет собой крепежный элемент в форме скобы с полками для крепления у основания. Для облегчения конструкций на боковых поверхностях и на спинке выполнены окна, но для обеспечения прочности и жесткости конструкции предусмотрены ребра жесткости толщиной 6,0 мм, соединяющие боковые поверхности со спинкой. Основные габаритные размеры: 355,5 × 175,2 × 98,0 мм. Деталь имеет равномерную толщину 7,0 мм, масса детали составляет 1,45 кг.

По чертежам деталей были спроектированы и построены математические модели отливок (рис. 5.12, 5.13).

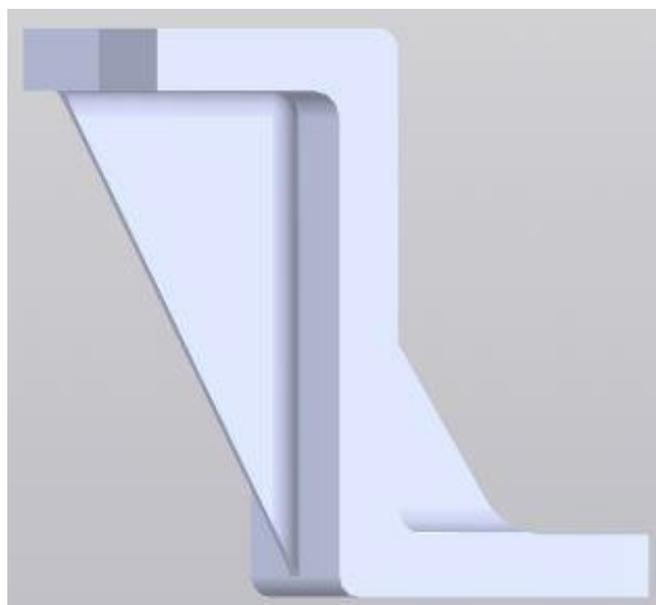


Рисунок 5.12 – Математическая модель отливки «Кронштейн 00.4101.252»

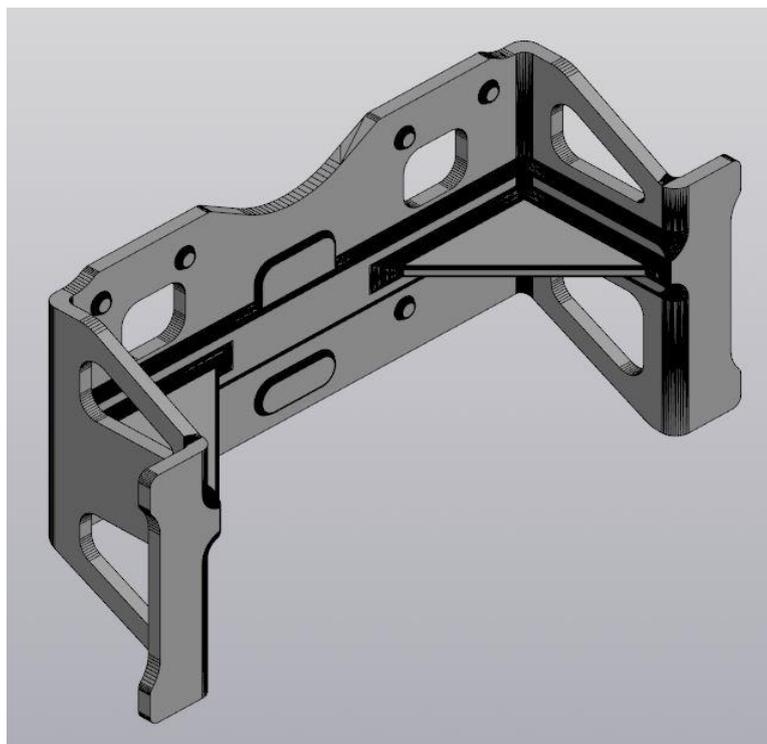


Рисунок 5.13 – Математическая модель отливки
«Кронштейн 00.4201.212»

На основании анализа конструктивных особенностей отливок была выбрана боковая ЛПС, которая обеспечивает спокойное (ламинарное) заполнение полости литейной формы, исключает возможность разбрызгивания и вспенивания расплава, сводит к минимуму окисление расплава, обеспечивает последовательное вытеснение воздуха и газов из полости формы, создает благоприятные условия для эффективного отделения неметаллических включений из расплава до его поступления в полость литейной формы [119].

Далее выполнили основные расчеты для проектирования литниково-питающих систем.

Норма расхода жидкого металла на одну отливку с учетом литниковой системы определяется по формуле [120]:

$$Q_1 = (1,1 \div 1,4) Q_{\text{отл}}, \quad (5.1)$$

где $Q_{\text{отл}}$ - масса отливки, кг;

Расчет элементов литниково-питающей системы производится по продолжительности заполнения полости формы.

$$\tau_{\text{опт}} = S_1 \cdot \sqrt[3]{\delta} \cdot \varrho_{p.m.} \quad (5.2)$$

где S_1 – коэффициент продолжительности заливки, зависящий от рода сплава, температуры заливки, типа литниковой системы и т. д.; δ – преобладающая толщина стенки отливки, мм; $\varrho_{p.m.}$ – норма расхода жидкого металла на одну форму, кг;

Лимитирующим сечением литниковой системы при изготовлении мелких и средних отливок из алюминиевых сплавов является сечение питателя, определяется по формуле:

$$F_{\text{min}} = Q_1 / \mu \cdot \tau_{\text{опт}} \cdot \sqrt{\rho \cdot 2gH_p} \quad (5.3)$$

где μ – коэффициент гидравлического сопротивления литниковой системы и формы; ρ – плотность жидкого алюминиевого сплава марки АК7ч; H_p – расчетный средний металлостатический напор, м.

Для нижнего подвода металла к полости отливки:

$$H_p = H_c - r^2 / 2H_0 \quad (5.4)$$

где H_c – высота стояка от места подвода металла в форму; H_0 – высота отливки; r – высота отливки от места подвода металла в форму.

Для мелких алюминиевых отливок при литье по выплавляемым моделям лимитирующим сечением является сечение стояка. Остальные элементы литниковой системы определяем из соотношения:

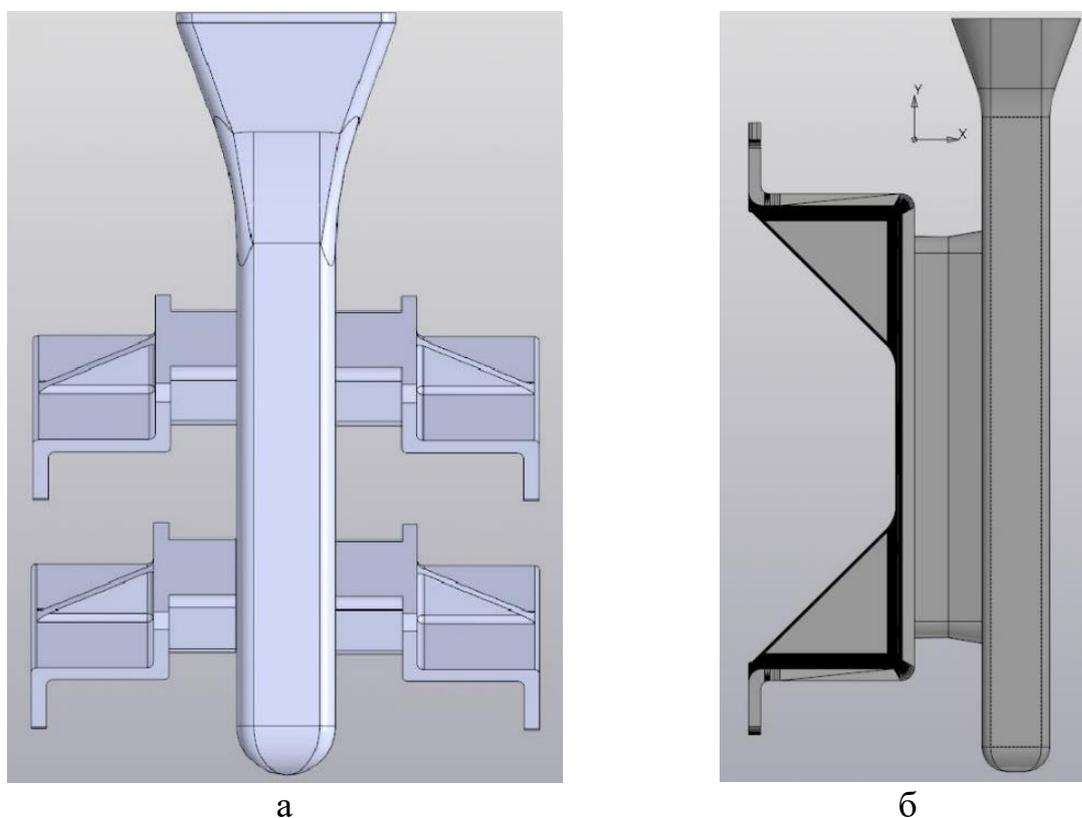
$$\Sigma F_c : \Sigma F_{\text{п}} = 1 : 3 \quad (5.5)$$

Полученные расчетные данные представлены в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Результаты расчетов ЛПС

Размерные характеристики ЛПС	«Кронштейн 00.4201.212»	«Кронштейн 00.4101.252»
Количество отливок на стояке, шт.	1	4
Суммарная площадь питателей, см ²	48,0	29,5 (7,375×4,0)
Площадь стояка, см ²	16,0	15,0
Высота стояка, см	45,0	24,0
Масса отливок с ЛПС, кг	4,1	1,4
Масса отливок без ЛПС, кг	1,45	0,2 (0,05×4)
Выход годного, %	35,0	14,2

На рисунке 5.14 представлены математические модели отливок с элементами ЛПС.



а - «Кронштейн 00.4101.252»; б - «Кронштейн 00.4201.212»

Рисунок 5.14 – Математические модели отливок с элементами литниково-питающих систем

Анализ расчетных данных (табл. 5.8) показал, что конструкции спроектированных модельных блоков (рис. 5.14) обуславливают низкие выходы годного литья.

Посредством серии расчетов и моделирования в САМ ЛП LVMFlow были определены оптимальные конструкции модельных блоков (табл. 5.10). Повышение выходов годного обеспечили за счет увеличения количества отливок на стояках.

Таблица 5.10 – Оптимизированные результаты расчетов ЛПС

Размерные характеристики ЛПС	«Кронштейн 00.4201.212»	«Кронштейн 00.4101.252»
Количество отливок на стояке, шт.	4	8
Суммарная площадь питателей, см ²	192,0 (48,0×4,0)	22,4 (2,8×8,0)
Суммарная площадь коллекторов, см ²	18,0 (9×2)	–
Площадь стояка, см ²	16,0	9,0
Высота стояка с отливкой, см	52,5	25,5
Масса отливок с ЛПС, кг	9,0	1,3
Масса отливок без ЛПС, кг	5,8 (1,45×4)	0,4 (0,05×8)
Выход годного, %	64	30

Результаты моделирования процессов формирования дефектов показали, что усадочные раковины и пористость формируются только в элементах литниково-питающих систем (рис. 5.15, 5.16).

Модели отливок и элементы ЛПС получали средствами аддитивного производства из полимера PLA по FDM-технологии [121].

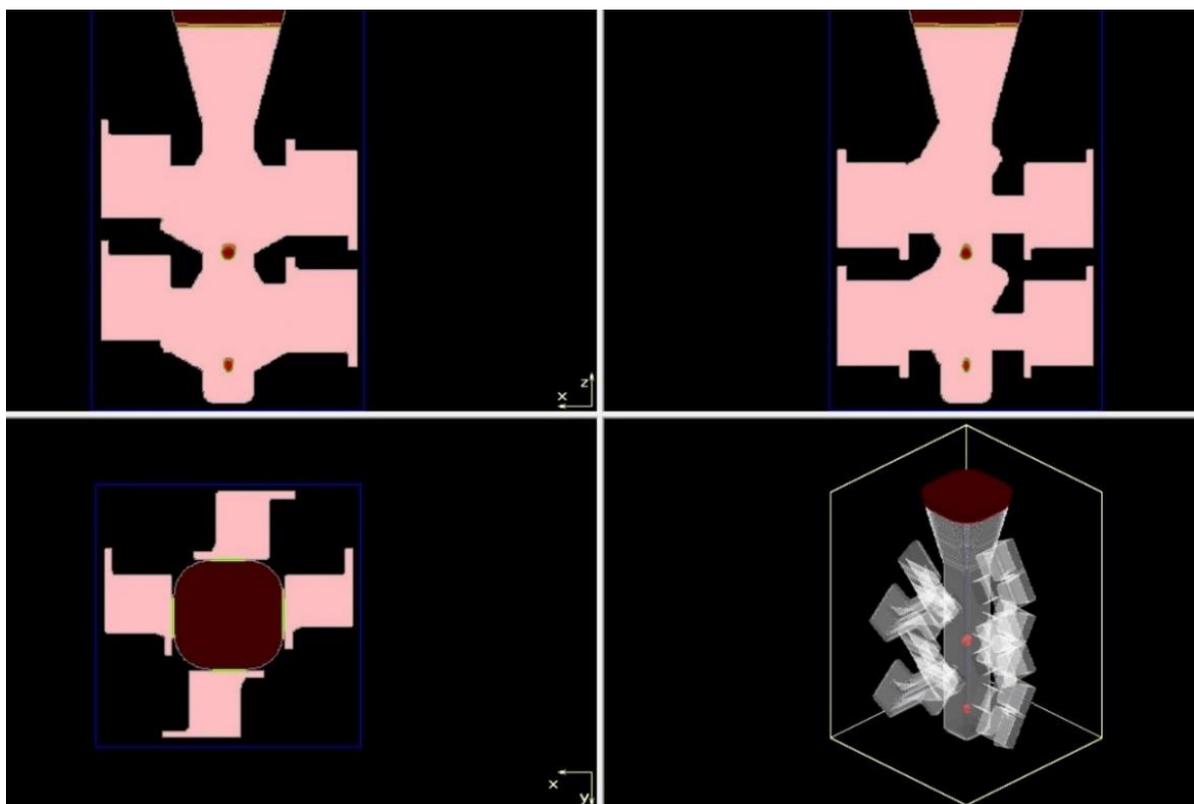


Рисунок 5.15 – Результат моделирования отливки «Кронштейн 00.4201.252» по оптимальной конструкции ЛПС

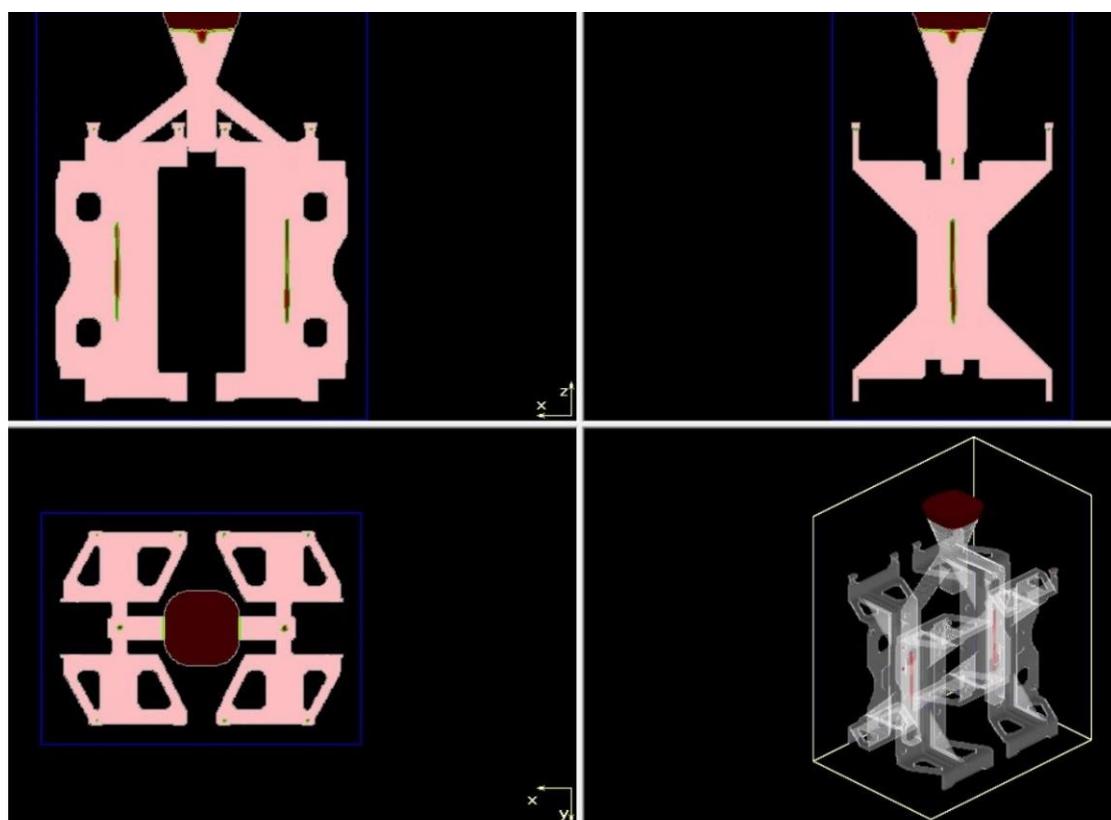
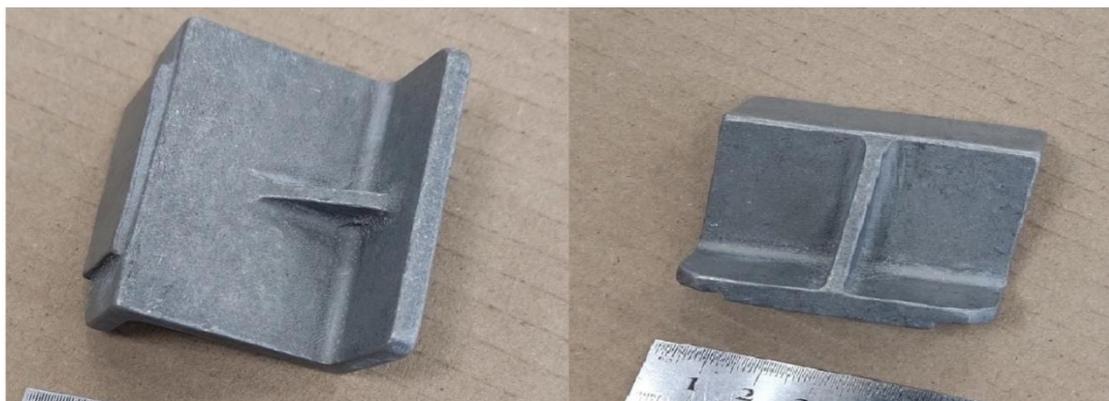


Рисунок 5.16 – Результат моделирования отливки «Кронштейн 00.4201.212» по оптимальной конструкции ЛПС

Огнеупорные керамические формы получали с использованием плавленного кварца марки «Кефрон» в качестве обсыпочно-го материала и связующего марки «Сиалит-20» по разработанному технологическому процессу применительно для литья по выплавляемым моделям в условиях Центра литейных технологий [122]. Модельный блок удаляли из ОКФ по совмещенному ступенчатому режиму, разработанному для выжигаемых моделей, полученных средствами аддитивного производства [121]. Совмещенный режим реализовывали в электрической печи сопротивления при температуре 850°С. По результатам визуального контроля после прокалики ОКФ брак по растрескиванию отсутствовал.

Заливка ОКФ расплавом производилась в опорном наполнителе. На рисунке 5.17 представлены годные отливки-представители после выбивки, отделения ЛПС и финишных операций (пескоструйная обработка и галтовка).



а



б

а - «Кронштейн 00.4101.252»; б - «Кронштейн 00.4101.212»

Рисунок 5.17 – Годные отливки из сплава АК7ч

Все отливки на входном контроле у заказчика проходили рентген-контроль на выявление скрытых дефектов, химического состава и механических свойств. По результатам входного контроля все отливки были признаны годными и запущены в дальнейшее производство.

Разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-12 «Синтезирование сплава АК7ч с применением деформированных отходов» (Приложение Д).

Выполненные работы подтверждены актом сдачи-приема работ (Приложение Е, Ж).

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. Опытнo-промышленные испытания полностью подтвердили результаты экспериментальных исследований.
2. Разработанные технологические схемы синтеза сплавов на основе рециклируемых ломов и отходов обеспечивают высокое качество рабочих сплавов и литых изделий из них.
3. Разработана и освоена технология получения припойного сплава А34 в виде литых прутков малых сечений в условиях Центра литейных технологий ФГБОУ ВО СамГТУ. Свойства литого припоя марки А34 в полной мере соответствует требованиям ОСТ 4Г 0.033.200 и заказчика в лице ЗАО ПФ «Плавка и пайка» (г. Москва).
4. Показана возможность использования пруткового припоя марки А34 в качестве присадочного материала для сварки заготовок из литейного (АК7ч) и деформируемого (АМг5) алюминиевых сплавов.
5. Разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-11 «Изготовление мелкокристаллического пруткового припоя А34». За период февраль 2022 г. по май 2023 г. было изготовлено и поставлено заказчику 1500 кг мелкокристаллического припоя марки А34.
6. Разработано и освоено производство полного цикла отливок литьем по выплавляемым моделям из синтезированного сплава АК7ч по заказу АО «Авиаагрегат» (г. Самара).
7. Технология получения сплава АК7ч характеризуется высоким уровнем воспроизводимости и стабильности: соответствие химического состава требованиям ГОСТ 1583-93; стабильно модифицированная структура сплава (размеры дендритов α -Al 13,2-15,1 мкм; размеры кристаллов Si₃ 10,2-17,2 мкм; плотность сплава в твердом состоянии ρ_s 2,676-2,683 г/см³).
8. Механические свойства сплава АК7ч в состоянии Т5 обеспечивают гарантированный запас над минимальными требованиями ГОСТ 1583-93: σ_b – на 47%; δ – в 1,6 раза; НВ – на 40%.

9. Разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-12 «Синтезирование сплава АК7ч с применением деформированных отходов».

10. Разработаны оптимальные конструкции литниково-питающих систем для получения отливок из сплава АК7ч, адекватность которых подтверждена расчетами, моделированием в САМ ЛП LVMFlow и натурными испытаниями. По результатам входного контроля у заказчика все отливки были признаны годными и направлены в дальнейшее производство.

11. Результаты опытно-промышленных испытаний подтверждены актами приема-сдачи работ, использования и внедрения результатов работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Выполненные экспериментальные исследования и опытно-промышленные испытания доказали эффективность разработанных технологических решений по рециклированию ломов и отходов для синтезирования алюминиевых сплавов и производства литой продукции из них.

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, используются в производственной деятельности Центра литейных технологий ФГБОУ ВО СамГТУ при выполнении финансируемых договоров по заказам предприятий реального сектора экономики (Приложение 3).

На основании выполненных исследований сделаны следующие основные выводы.

1. *Разработаны дополнительные критерии качества дисперсных отходов на основе алюминия: баночного лома, сыпучей стружки литейных сплавов и вьюнообразной стружки деформируемых сплавов. Критерии учитывают общую загрязненность ломов и отходов (критерий чистоты $k_{ч}$), контакт поверхности с атмосферой печи (k_A) и максимально возможное извлечение металла (критерий M_{Me}).*

2. *Разработаны комплексные технологические схемы переплавов сыпучей (АК9ч) и вьюнообразной стружек (АМг6), обеспечивающие МВГ на уровне 93-97% и получение предварительных сплавов без шлаковых включений, газовых раковин и пористости. Химические составы предварительных сплавов АК9ч и АМг6 соответствуют требованиям ГОСТ 1583-93.*

3. *Разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-9 «Рециклирование сыпучей стружки литейных сплавов системы Al-Si».*

4. *Разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-10 «Рециклирование вьюнообразной стружки деформируемых сплавов систем Al-Mg, Al-Cu».*

5. *Экспериментально подтверждена адекватность разработанных дополнительных критериев качества деформированных отходов и ломов при синтезировании сплавов АК7ч, АК12, АК6М2 и АМг5. Наименьшим металлургическим выходом годного (82%), худшими физико-механическими свойствами характери-*

зовался сплав АК12, синтезированный на основе баночных ломов, которому по совокупности разработанных критериев был присвоен 4-5 балл из 10. Высокие МВГ были получены при синтезировании сплава АК6М2 (94%) и АМг5 (96%), в составы шихт которых входила выюнообразная стружка сплавов Д16 и АМг6.

6. *Экспериментально установлена закономерность*, показывающая влияние деформированных отходов (Д-шихты) и содержания водорода на плотность сплавов в жидком состоянии. Меньшим газосодержанием и повышенной плотностью характеризовались расплавы, полученные с применением Д-шихты.

7. *Доказано, что дополнительным резервом* повышения качества рабочих сплавов, получаемых с максимальным использованием отходов в составе шихты, является экономное модифицирование добавками микрокристаллических переплавов в количестве не более 1,5% по массе.

8. *Разработана и освоена технология* получения припойного сплава А34 в виде литых прутков малых сечений в условиях Центра литейных технологий ФГБОУ ВО СамГТУ. Свойства литого припоя марки А34 соответствуют требованиям ОСТ 4Г 0.033.200. *Разработана* технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-11 «Изготовление мелкокристаллического пруткового припоя А34». За период февраль 2022 г. по май 2023 г. было изготовлено и поставлено заказчику 1500 кг микрокристаллического припоя марки А34.

9. *Разработана технология* получения сплава АК7ч, которая характеризуется высоким уровнем воспроизводимости и стабильности: соответствие химического состава требованиям ГОСТ 1583-93; стабильно модифицированная структура сплава (размеры дендритов α -Al 13,2-15,1 мкм; размеры кристаллов Si, 10,2-17,2 мкм; плотность сплава в твердом состоянии ρ_s 2,676-2,683 г/см³). Механические свойства сплава АК7ч в состоянии Т5 обеспечивают гарантированный запас над минимальными требованиями ГОСТ 1583-93: σ_b – на 47%; δ – в 1,6 раза; НВ – на 40%. *Разработана* технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-12 «Синтезирование сплава АК7ч с применением деформированных отходов».

10. *Разработана технология и освоено* производство отливок из синтезированного сплава АК7ч литьем по выплавляемым моделям.

11. Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, используются в производственной деятельности Центра литейных технологий ФГБОУ ВО СамГТУ при выполнении финансируемых договоров по заказам предприятий реального сектора экономики.

12. Результаты опытно-промышленных испытаний подтверждены актами приема-сдачи работ, использования и внедрения результатов работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nappi C. The Global Aluminium Industry 40 years from 1972 / World Aluminium. – 2013. – 27 p.
2. Dudin M.N. Modern trends and challenges of development of global aluminium industry [текст] / M.N. Dudin, N.A. Voykova, E.E. Frolova, J.A. Artemieva, E.P. Rusakova, A.H. Abashidze // Metalurgija. – 2017. - vol. 56. - pp. 255–258.
3. Дорошенко В. С. Развитие технологии и расширение производства отливок из алюминиевых сплавов в начале XXI века [текст] / В.А. Гнатуш // Промышленность в фокусе. - 2019. - №4. - С. 48-52.
4. Шварцкопф Н.В. Проблемы и перспективы развития алюминиевой промышленности России [текст] / Н.В. Шварцкопф // Эпоха науки. - 2020. - № 23. - С. 146-148.
5. Алюминиевая ассоциация. Стратегия 2020-2030. Актуализация 2021. http://energoservise.com/files/Strstegiya_alum_accoziazii_2020-2030.
6. Никитин К.В. Рециклинг металлов и сплавов. учеб. пособ. / К.В. Никитин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2020. – 49 с.
7. Гуреева М.А. Свариваемые алюминиевые сплавы в конструкциях транспортных средств [текст] / М.А. Гусева, О.Е. Грушко, В.В. Овчинников // Заготовительные производства в машиностроении. - 2009. - №3. - С.11-21.
8. Казанцев, Г.Ф. Переработка лома и отходов цветных металлов в ионных расплавах / Г.Ф. Казанцев, Н.М. Барбин, И.Г. Бродова и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 210 с.
9. Алюминиевая ассоциация. Алюминий в судостроении. <https://www.aluminas.ru/aluminum/article/aluminium-in-shipbuilding/?ysclid=lio6lg4o8710347332>
10. Воронина М. Будет обидно, если производство алюминиевых вагонов начнется не в Самарской области / М. Воронина // Самарское обозрение. - 2012. - №78.
11. Алюминиевая ассоциация. Алюминий в грузовом вагоностроении: мировой и российский опыт. <https://www.aluminas.ru/media/media->

[publications/alyuminiy_v_gruzovom_vagonostroenii_mirovoy_i_rossiyskiy_opyt/?ysclid=lio6sbxln880948398](https://www.aluminas.ru/publications/alyuminiy_v_gruzovom_vagonostroenii_mirovoy_i_rossiyskiy_opyt/?ysclid=lio6sbxln880948398).

12. Стратегия развития железнодорожного транспорта РФ до 2030 г. Постановление Правительства РФ от 17.06.2008 г. №877-р. 171 с.

13. Ефремов А.В. Использование материалов в электротехнической промышленности на основе алюминия [текст] / А.В. Ефремов // Вестник магистратуры. – 2018. - №4-7. - С. 18-19.

14. Алюминиевая ассоциация. Алюминиевые сплавы, как основа для инновационных технологий и материалов в современном строительстве. 2020. https://www.aluminas.ru/upload/iblock/bf5/02_O.Ogorodnikova_Alyuminievye-splavy-kak-osnova-dlya-innovatsionnykh-tekhnologiy-i-materialov-v-sovremennom-stroitelstve.pdf?ysclid=lio7d10k2b298723824.

15. Коргин А.В. Перспективы и проблемы применения алюминиевых сплавов при строительстве мостов в российской федерации [текст] / В.А. Романец, В.А. Ермаков, Л.З. Килани // Вестник БГТУ им. Б.Г. Шухова. - 2018. - №9. - С. 42-47.

16. Фридляндер. И.Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные сплавы на их основе [текст] / И.Н. Фридляндер // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2002. - №7. - С. 24-29.

17. Алюминиевая ассоциация. Алюминиевые решения для нефтегазовой промышленности и энергетики. 2022. https://www.aluminas.ru/media/media-publications/alyuminievye_resheniya_dlya_neftegazovoy_promyshlennosti_i_vodorodnoy_energetiki/?ysclid=lio9fisx1n103042330.

18. Алюминиевая ассоциация. План мероприятий по стимулированию спроса на продукцию алюминиевой промышленности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу до 2030 года. https://www.aluminas.ru/media/press-releases/pravitelstvo_rf_utverdilo_plan_razvitiya_sprosa_na_alyuminievuyu_produktsiyu/.

19. Гуляев Б.Б. Решенные и нерешенные задачи теории литейных процессов // Литейное производство. – 1990. -№9. – С. 2-3.

20. ГОСТ 30772-2001. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения. М.: ВНИЦСМВ Госстандарта России. 2001. 22 с.
21. Степанова С.А. Отходы? Нет плохо переработанное сырье: о концептуальных основах использования вторичных ресурсов [текст] / С.А. Степанова // *Металлы Евразии*. -2003. -№5. -С. 4-6.
22. Степанова С.А. Участие России в инициативе стран «Группа восьми» по вторичному использованию отходов производства [текст] / С.А. Степанова // *Литейщик России*. - 2006. - №5. – С. 7-8.
23. Никитин В.И. Наследственность в литых сплавах: монография [Текст] / В.И. Никитин, К.В. Никитин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение – 1, 2005. – 476 с.
24. Gaustad G. Improving aluminum recycling: A survey of sorting and impurity removal technologies [текст] / G. Gaustad, E. Olivetti, R. Kirchain // *Resources, Conservation and Recycling*. - 2012. - No. 58. - P. 79– 87.
25. Saravanakumar P. Role of salt fluxes in aluminium refining: a review [текст] / P. Saravanakumar, J. Bhoopashram, M. Kavin Prasath, M. Jaycharan // *International Journal of Latest Engineering and Management Research*. - 2017. - Vol. 2. - Issue 9. - P. 45-51.
26. Макаров Г.С. Высокие технологии в рециклинге алюминия: возможности и перспективы [текст] / Г.С. Макаров // *Цветные металлы*. – 2006. - № 8. - С. 112-117.
27. ГОСТ 1583-93. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. 30 с.
28. ГОСТ РФ 54564-2011. Лом и отходы цветных металлов и сплавов. Технические условия. Введ. – 2011. М.: Стандартинформ, 2011. – 62 с.
29. Tsakiridis P.E. Aluminium salt slag characterization and utilization – A review. *J. Hazard. Mater.* - 2012. - Vol. 217-218. - P. 1–10.

30. Никитин К.В. Управление качеством литых изделий из алюминиевых сплавов на основе явления структурной наследственности [текст] / К.В. Никитин, В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин. М.: Радунца. - 2015. – 228 с.
31. Selyanin I.F. Resource-saving and environment-saving production technologies of secondary aluminum alloys [текст] / I.F. Selyanin, V.B. Deev, A.V. Kukharenko // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. - 2015. - Vol. 56. - No. 3. - P. 272–276
32. Hatayama H. Evolution of aluminum recycling initiated by the introduction of next-generation vehicles and scrap sorting technology [текст] / H. Hatayama, I. Daigo, Y. Matsuno, Y. Adachi // Resour. Conserv. Recycl. - 2012. - Vol. 66. - P. 8–14.
33. Mustafa A. Recycling of aluminum castings waste [текст] / Mustafa A. Rijab, Ali I. Al-Mosawi, Shaymaa A. Abdulsada, Raied K. Ajmi // EC Chem. - 2015. - Vol. 1. - Iss. 2. - P. 48–55.
34. Макаров Г.С. Перспективы рециклинга алюминия в России [текст] / Г.С. Макаров // Технология легких сплавов. - 2007. - № 2. - С. 81–87.
35. Peterson R.D. Review of aluminum dross processing / R.D. Peterson, L. Newton [текст] // Light Metals: Proceedings of Sessions, TMS Annual Meeting. - 2002. - P 1029–1037.
36. Gel V.I. Development of aluminium scrap melting technology [текст] / V.I. Gel, D.N. Rudakov // Non-Ferr. Met. - 2013. - No. 2. - P. 35–39.
37. Thoraval M. Metal entrapment in slag during the aluminium recycling process in tilting rotary furnace [текст] / M. Thoraval, B. Friedrich // In: Proc. EMC: Eur. Metal. Conf. (Düsseldorf, Germany, 14–17 June 2015). Clausthal- Zellerfeld. - 2015. - P. 1–10.
38. Calder G.V. Aluminum reactions and problems in municipal solid waste landfills [текст] / G.V. Calder, T.D. Stark // J. Hazardous, Toxic and Radioactive Waste. - 2010. - No. 14. - P. 258–265.
39. Shaymaa Abbas Abdulsada. Preparation of aluminum alloy from recycling cans wastes [текст] / Shaymaa Abbas Abdulsada // Int. J. Current Eng. Technol. - 2013. - Vol. 3. - No. 4. - P. 1348–1350.

40. Gronostajski J. New methods of aluminium and aluminium- alloy chips recycling [текст] / J. Gronostajski, H. Marciniak, A. Matuszak // J. Mater. Process. Technol. - 2000. - Vol. 106. - Iss. 1-3. - P. 34–39.
41. Amini Mashhadi H. Recycling of aluminium alloy turning scrap via cold pressing and melting with salt flux [текст] / H. Amini Mashhadi, A. Moloodi, M. Golestanipour, E. Z. V. Karimi // J. Mater. Process. Technol. - 2009. - Vol. 209. - Iss. 7. - P. 3138–3142.
42. Velasco E. Recycling of aluminium scrap for secondary Al–Si alloys [текст] / E. Velasco, J. Nino // Waste Manag. Res. - 2011. - Vol. 29. - Iss. 7. - P. 686–693.
43. Gökhan Özer. A study on the recycling of aluminium alloy 7075 scrap [текст] / Gökhan Özer, Sarp Burgucu, Müzeyyen Marşoğlu // Mater. Test. - 2012. - Vol. 54. - No. 3. - P. 175–178.
44. Løvik A.N. A material flow model for impurity accumulation in beverage can recycling systems [текст] / A.N. Løvik, D.B. Müller // Light Metals. - 2014. - P. 907–911.
45. Adam J. Gesing. Production of magnesium and aluminum-magnesium alloys from recycled secondary aluminum scrap melts [текст] / Adam J. Gesing, Subodh K. Das, Raouf O. Loutfy // J. Miner. Met. Mater. Soc. - 2016. - Vol. 68. - No. 2. - P. 585–592.
46. Yuksel C. Quality evaluation of remelted A356 scraps [текст] / C. Yuksel, O. Tamer, E. Erzi. U. Aybarc, E. Cubuklusu, O. Topcuoglu, M. Cigdem, D. Dispinar // Arch. Foundry Eng. - 2016. - Vol. 16. - Iss. 3. - P. 151–156.
47. Yusuf N.K. Hot press as a sustainable direct recycling technique of aluminium: mechanical properties and surface integrity [текст] / N.K. Yusuf, M.A. Lajis, A. Ahmad // Materials. - 2017. - Vol. 10. - P. 1–18.
48. Загиров Н.Н. Технологические основы получения материалов и изделий из сыпучих отходов сплавов алюминия [текст] / Н.Н. Загиров, Ю.Н. Логинов, С.Б. Сидельников, Е.В. Иванов // Красноярск: СФУ. - 2019. – С. 204.

49. Загиров Н.Н. Переработка алюминиевых банок в прутки и проволоку неотвественного назначения, исключая их переплав [текст] / Н.Н. Загиров, Ю.Н. Логинов, С.Б. Е.В. Иванов, Е.В. Феськова // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. - 2020. - Т.18. - №3. - С. 50-57.

50. Ibragimov, V.E. Remelting of highly polluted metallic aluminum scrap with ecological refining reagents [текст] / Ibragimov V.E., Bazhin V.Yu. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). – 2019. - №537 (6). - PP. 1-7.

51. Ибрагимов, В.Э. Плавка тонкостенного лома с лакокрасочными покрытиями для получения алюминиевого сплава [текст] / Ибрагимов В.Э., Гарсия Л.М., Бажин В.Ю. // Международный научно-исследовательский журнал. - 2016. - №2 (44), часть 2. - С. 14-17.

52. Ибрагимов, В.Э. Проблема продуцирования экологически небезопасных твердых отходов при термическом рециклинге алюминиевых сплавов [текст] / В.Э. Ибрагимов // Международный научный журнал "Инновационное развитие". - 2017. - № 5. - С. 18-20.

53. Ибрагимов В.Э. Разработка бессолевого технологии переработки металлизированных алюминиевых отходов для получения лигатур системы алюминий-магний-кремний [текст] / В.Э. Ибрагимов// IX Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии научного развития». – 2017. - г. Казань. - С.68-71.

54. Ибрагимов В.Э. Проблемы повышения доли производства и потребления вторичных алюминиевых сплавов [текст] / В.Э. Ибрагимов // Всероссийская научно-практическая конференция "Национальная безопасность России: актуальные аспекты". Материалы конференций ГНИИ «НАЦРАЗВИТИЕ». – СПб.: ГНИИ «НАЦРАЗВИТИЕ». - 2018. - С. 52-57.

55. Khraisat W., Abu Jadayil W. Strengthening aluminum scrap by alloying with iron [текст] // W. Khraisat, W. Abu Jadayil // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. - 2010. - Vol.4. - No.3. - P. 372-377.

56. Kamguo Kamga H. Solidification of aluminum-copper B206 alloys with iron and silicon additions [текст] / Kamga H. Kamguo, D. Larouche, M. Bournane, A. Rahem // Metallurgical and materials transactions A. - 2010. - Vol.41. - P. 2844-2855.
57. Галушко А. М. Некоторые особенности технологии и организации рециклинга алюминия и его сплавов [текст] / А.М. Галушко, С.П. Королев, В.Л. Трибушевский, В.М. Михайловский, Л.В. Трибушевский, А.Г. Шешко, М.С. Королев // Литье и металлургия. - 2010. - № 1, 2. - С. 122-127.
58. Лысенко А.П. Задачи и перспективы переработки оксидно-солевых отходов вторичной металлургии алюминия [текст] / А.П. Лысенко, Д.С. Пузанов // Вестн. МГОУ. - 2011. - № 3. - С. 10–14.
59. Трибушевский Л. В. Применение алюминиевых шлаков и продуктов их переработки в металлургическом производстве [текст] / Л.В. Трибушевский, Б.М. Немененок, Г.А. Румянцева, А.В. Арабей // Металлургия. - 2021. - №4. - С. 42-49.
60. Ghorab H. Characterization and recycling of aluminum slag [текст] / H. Ghorab, M. Rizk, A. Matter, A.A. Salama // Polymer-Plast. Technol. Eng. - 2004. - Vol. 43. - P. 1663–1673.
61. Huang X.-L. Characterization of salt cake from secondary aluminum production [текст] / Huang X.-L., El Badawy A., Arambewela M., Ford R., Barlaz M., Tolaymat T J. Hazard. Mater. - 2014. - Vol. 273. - P. 192–199.
62. Никитин К.В. Применение продуктов рециклинга алюминиевых шлаков в технологиях литья по выплавляемым моделям [текст] / К.В. Никитин, А.В. Соколов, В.И. Никитин, В.Н. Дьячков // Известия вузов. Цветная металлургия. - 2018. - №6. - С. 58-71.
63. Тимошкин И.Ю. Основные проблемы и направления в производстве качественных алюминиевых сплавов из рециклируемых металлических отходов [текст] / И.Ю.Тимошкин, К.В.Никитин, В.И. Никитин // Литейщик России. - 2010. - № 8. - С. 24-26.
64. Никитин В.И. Явление структурной наследственности в литейно-металлургических технологиях [текст] / В.И. Никитин, К.В. Никитин // Труды

VIII-й Всеросс. науч.-техн. конф. «Наследственность в литейно-металлургических процессах». Самара: СамГТУ. - 2018. - С. 107-120.

65. Никитин В.И. Технологии генной инженерии в литых сплавах – это реальность [текст] / В.И. Никитин, К.В. Никитин // Труды 12-го съезда литейщиков России. Нижний Новгород. - 2015. - С. 244-251.

66. Никитин В.И. Перспективы применения ЯСН в литейном производстве [текст] / В.И. Никитин, К.В. Никитин // Труды 11-й междунар.практ.конф. «Литейное производство сегодня и завтра». СПб: Культ-информ-пресс. - 2016. - С. 307-321.

67. Никитин В.И. Генное модифицирование алюминиевых литейных и деформируемых сплавов [текст] / В.И. Никитин, К.В. Никитин // Metallurgia машиностроения. – 2016. - №5. – С. 10-14.

68. Nikitin K.V. Application of genetic engineering technologies to reduce the hold time under heat treatment of Al-Si cast aluminium alloys [текст] / V.I. Nikitin, K.V. Nikitin // Proceeding 26th IFHTSE CONGRESS 2019. International congress in metal science and heat treatment. - Moscow: Metallurgizdat. - 2019. – P. 47-51/

69. Никитин В.И. Получение сплава АК7ч методами генной инженерии [текст] / В.И. Никитин, К.В. Никитин, И.Ю. Тимошкин, Е.В. Папшев // Литейное производство. – 2019. - №3. – С. 12-15.

70. Никитин В.И. Вклад явления структурной наследственности в развитие литейно-металлургических технологий: итоги и перспективы [текст] / В.И. Никитин, К.В. Никитин // Литейщик России. – 2019. - №7. – С. 9-15.

71. Nikitin K.V. Application of structural inheritance phenomenon at producing the AL-MG system alloys [текст] / K.V. Nikitin, V.I. Nikitin, D.G. Chernikov // Key engineering materials. – 2016. – vol.684. P. 269-272.

72. Nikitin K.V. Melt treatment by pulsed magnetic fields aimed at controlling the structure and properties of industrial silumins [текст] / K.V. Nikitin, V.I. Nikitin, I.YU. Timoshkin, V.A. Glushchenkov, D.G. Chernikov // Russian journal of non-ferrous metals. – 2016. - №3. – vol. 57. – P. 202-210.

73. Nikitin K.V. Influence of various types of treatment on the structure, density, and electrical conductivity of deformed alloys of the AL–MG system [текст] / K.V. Nikitin, V.I. Nikitin, V.A. Glushchenkov, D.G. Chernikov, D.S. Krivopalov // Russian journal of non-ferrous metals. – 2017. - №5. – vol. 58. – P. 475-480.

74. Nikitin K.V. Influence of treatment of melts by electromagnetic acoustic fields on the structure and properties of alloys of the AL–SI system [текст] / K.V. Nikitin, V.I. Nikitin, I.YU Timoshkin, V.B. Deev // Russian journal of non-ferrous metals. – 2016. - №5. – vol. 57. – P. 419-423.

75. Никитин К.В. Исследование наследственного влияния структуры лигатур Al-20%Si на свойства бинарных силуминов [текст] / К.В. Никитин, В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин // Литейщик России. - 2009. - №12. – С. 23-27.

76. Никитин К.В. Влияние структуры лигатуры AlSi20 на микроструктуру и вязкость модельного силумина Al–6%Si в твердом и жидком состояниях [текст] / К.В. Никитин, И.Ю. Тимошкин, А.Б. Финкельштейн, О.А. Чикова // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. - 2013. - № 3. - С. 51-57.

77. Никитин К.В., Тимошкин И.Ю., Финкельштейн А.Б., Чикова О.А. Взаимосвязь структуры и свойств лигатуры AlSi20 в системе «твердое - жидкое - твердое» [текст] / К.В. Никитин, И.Ю. Тимошкин, А.Б. Финкельштейн, О.А. Чикова // Металлургия машиностроения. – 2013. - №6. – С. 12-15.

78. Никитин, К.В. Влияние структуры лигатур AlFe5, полученных из рециклируемых стальных отходов, на свойства алюминиевых сплавов [текст] / К.В. Никитин, В.И. Никитин, В.Б. Деев, И.Ю. Тимошкин // Цветные металлы. – 2020. - № 8. – С. 75-81.

79. Никитин К.В. Получение и применение наноструктурированных модифицирующих лигатур для Al-сплавов [текст] / К.В. Никитин, В.И. Никитин, Д.С. Кривоपालов, В.Т. Федотов, С.С. Петрунин // Литейное производство. - 2014. - № 12. - С. 5-7.

80. Никитин К.В. Влияние условий кристаллизации на структуру модифицирующей лигатуры Al-Sc [текст] / К.В. Никитин, В.И. Никитин, Д.С. Криво-

палов, В.И. Напалков, С.В. Махов, А.А. Дуженко // Литейное производство. - 2014. - № 11. - С. 5-8.

81. Никитин К.В. Модифицирование алюминия и магния микрокристаллическими лигатурами, содержащими переходные металлы расплавов [текст] / К.В. Никитин, В.И. Никитин, Д.С. Кривопапов // Литейщик России. - 2015. - № 7. - С. 36-39.

82. Никитин К.В. Влияние способов получения лигатуры AlTi на ее структуру и эффективность при модифицировании алюминиевых сплавов [текст] / К.В. Никитин, В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. - 2018. - № 4. - С. 45-52.

83. Никитин К.В. Влияние температуры нагрева и модифицирования расплава Al – 27 % Cu – 6 % Si на строение и фазовый состав закристаллизованных образцов [текст] / К.В. Никитин, О.А. Чикова, И.Ю. Тимошкин, А.Н. Константинов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. - №4. – С. 30-35.

84. Nikitin K.V. Method for obtaining ingots of the A34 solder based on an investigation into the relation between the structure and properties of liquid and solid metals [текст] / K.V. Nikitin, O.A. Chikova, A.N. Konstantinov // Russian journal of non-ferrous metals. – 2013. - №6. – vol. 54. – P. 484-488.

85. Никитин К.В. Технология получения литых припоев малых сечений на основе алюминия и цинка [текст] / К.В. Никитин, В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин, А.С. Овчинников, А.И. Сашин // Металлургия машиностроения. – 2016. - №1. – С. 22-24.

86. Никитин К.В. Исследование структуры и свойств припоев на основе алюминия и цинка в виде литых прутков малых сечений [текст] / К.В. Никитин, В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. - 2018. - № 5. - С. 39-47.

87. Никитин В.И. Синтезирование алюминиевых сплавов на основе ба-
ночных отходов [текст] / В.И. Никитин, К.В. Никитин, В.В. Романюк, Е.Ю. Ели-
нов // Литейщик России. - 2014. - № 9. - С. 43-46.

88. Никитин К.В. Наследственное влияние деформированных отходов на физические свойства сплава 1420 [текст] / К.В. Никитин, В.И. Никитин, Я.А. Ерисов, А.В. Федотов // *Металлургия машиностроения*. – 2015. - № 6. – С. 32-34.
89. Никитин В.И. Синтезирование силуминов с использованием отходов деформируемых сплавов [текст] / В.И. Никитин, К.В. Никитин, В.В. Романюк // *Металлургия машиностроения*. – 2017. - №1. – С. 21-25.
90. Деев В.Б. Получение герметичных алюминиевых сплавов из вторичных материалов [текст] / В.Б. Деев. - М.: Флинта: Наука, 2006.
91. Deev V.B. Promising resource saving technology for processing melts during production of cast aluminum alloys [текст] / V.B. Deev, I.F. Selyanin, A.I. Kutsenko, N.A. Belov, K.V. Ponomareva // *Metallurgist*. 2015. Vol. 58. No. 11-12. P. 1123–1127.
92. Батышев А.И. О влиянии давления на наследственность алюминиевых сплавов [текст] / А.И. Батышев, К.А. Батышев // *Рынок вторичных металлов*. - 2006. - №3. - С. 39-40.
93. Батышев А.И. О наследственности в алюминиевых сплавах [текст] / А.И. Батышев, К.А. Батышев, С.В. Гольцов // *МГОУ-XXI-Новые технологии*. - 2007. - №1. - С.32-35.
94. Батышев К.А. О влиянии повторяющихся циклов «переплав-затвердевание под давлением» на свойства отливок [текст] / К.А. Батышев // *Труды VII междунар. науч.-техн. симпозиума «Наследственность в литейных процессах»*. Самара: СамГТУ. - 2008. - С.134.
95. Батышев К.А. Влияние механического давления на наследственность алюминиевых сплавов [текст] / К.А. Батышев // *Труды VIII-й Всеросс. науч.-техн. конф. «Наследственность в литейно-металлургических процессах»*. Самара: СамГТУ. - 2018. - С. 191-195.
96. Батышев К.А. О возможности переплава низкосортного вторичного сырья с целью получения качественных цинковых сплавов [текст] / К.А. Батышев, С.В. Колосков, Е.Д. Демьянов, Р.Ф. Юсипов // *Труды VIII-й Всеросс. науч.-техн.*

конф. «Наследственность в литейно-металлургических процессах». Самара: СамГТУ. - 2018. - С. 323-327.

97. Батышев К.А. Получение сплава ЦАМ 4-1 из низкосортного вторичного сырья [текст] / К.А. Батышев, С.В. Колосков, Е.Д. Демьянов, К.Г. Семенов, Р.Ф. Юсипов // Наследственность в литейно-металлургических процессах: материалы 8-й всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Самара: СамГТУ. – 2018. С. 332-339.

98. Ри Хосен. Современные технологии производства алюминиевых сплавов [текст] / Хосен Ри, Э.Х. Ри, С.Н. Химухин, В.И. Якимов // Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та. - 2015. — 131 с.

99. Ри Э.Х. Получение эффективных модификаторов для высокопрочного чугуна и Al-сплавов [текст] / Э.Х. Ри, Хосен Ри, М.А. Калаушин, С.Н. Химухин, А.В. Гончаров // Литейное производство. - 2017. - №3. - С. 2-5.

100. Пат. 131379 (РФ). Устройство для отбора алюминиевого расплава / К.В. Никитин, В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин, П.И. Панышев, В.Н. Дьячков. 2013.

101. Никитин К.В. Экспресс-метод определения плотности алюминиевых расплавов [текст] / К.В. Никитин, В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин // Metallurgia машиностроения. – 2016. - №4. – С. 22-26.

102. Каплан Б.Я. Метрология аналитического контроля производства в цветной металлургии [Текст] / Б.Я. Каплан, Л.Н. Филимонов, И.А. Майоров. М.: Металлургия. - 1989. – С. 200.

103. Романюк В.В. Результаты исследования качества низкосортных алюминиевых отходов [текст] / В.В. Романюк, В.И. Никитин, Р.М. Биктимиров // Metallurgia машиностроения. – 2018. - №6. – С. 24-27.

104. Никитин В.И. Исследование и разработка технологии переплава алюминиевой стружки [текст] / В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин, Р.М. Биктимиров, А.Н. Фролов // Metallurgia машиностроения. – 2019. - №1. – С. 8-13.

105. Nikitin V. I. Synthesis of Aluminum Alloys from Dispersed Waste Based on Aluminum [текст] / V.I. Nikitin, K.V. Nikitin, I.YU. Timoshkin, R.M. Biktimirov // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. - 2020. - Vol. 61. - №. 6. - P. 632–640.

106. Никитин К.В. Влияние различных видов обработки на структуру, плотность и электропроводность деформируемых сплавов системы Al–Mg [текст] / К.В. Никитин, В.И. Никитин, Д.С. Кривопапов, В.А. Глушечков, Д.Г. Черников // Изв. вузов. Цвет. Metallurgy. 2017. №. 4. С. 46-52.

107. Nikitin K. V. Hereditary Influence of Deformed Waste on the Efficiency of Modification of Alloy Systems Al–Si–Mg and Al–Mg [текст] / V.I. Nikitin, K.V. Nikitin, I.YU. Timoshkin, R.M. Biktimirov, A.P. Novikov // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. - 2022. - Vol. 63. - № 4. - P. 400–408.

108. Никитин В.И. Повышение качества сплава АК9ч методами генной инженерии [текст] / В.И. Никитин, К.В. Никитин, Р.М. Биктимиров, А.П. Новиков, С.А. Акишин // Литейщик России. – 2021. - № 9. - С. 9-17.

109. Никитин В.И. Синтезирование сплава АК9ч на основе использования деформированных отходов [текст] / В.И. Никитин, К. В. Никитин, Р.М. Биктимиров, А.П. Новиков, С.А. Акишин // Литейное производство. - 2021. - №10. - С. 12-14.

110. Никитин В.И. Синтезирование силумина АК12 на основе применения деформированных шихтовых металлов [текст] / В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин, Р.М. Биктимиров // Литейщик России. - 2019. - №7. - С. 37-39.

111. Патент РФ №2448180, приоритет от 16.06.2016г. Способ приготовления мелкокристаллической алюминиево-кремниевой лигатуры / К.В. Никитин, В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин

112. Никитин В.И. Получение сплавов системы Al–Mg на основе технологий генной инженерии [текст] / В.И. Никитин, Р.М. Биктимиров, К.В. Никитин, М.А. Путилов. С.А. Акишин //Литейное производство. - 2021. - №11. - С. 2-8.

113. Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. Изд. 2-е. [Текст] / М.В. Мальцев. М.: Metallurgy. - 1970. – С. 364.

114. ГОСТ 17325-79. Пайка и лужение. Основные термины и определения. М.: Издательство стандартов. 1989. 22 с.
115. ГОСТ 19248-90. Припой. Классификация и обозначения. М.: ГК СССР по управлению качеством продукции и стандартам. 1990. 7 с.
116. ОСТ 4Г 0.033.200. Припой и флюсы для пайки, припойные пасты. Марки, состав, свойства и область применения. М.: 2011. 130 с.
117. Konstantinov A.N. Method for obtaining ingots of the A34 solder based on an investigation into the relation between the structure and properties of liquid and solid metals [текст] / A.N. Konstantinov, O.A. Chikova, K.V. Nikitin // Russ. J. Non-Ferr. Met. - 2013. - Vol. 54. - № 6. - P. 484–488.
118. Nikitin K.V. Effect of heating temperature and modification of Al–27%Cu–6%Si melt on the structure and phase composition of crystallized specimens [текст] / K.V. Nikitin, O.A. Chikova, I.YU. Timoshkin, A.N. Konstantinov // *Met. Sci. Heat Treat.* - 2013. - Vol. 55. - № 3–4. - P. 30–35.
119. Зонненберг Н.Н. Проектирование и расчёт литниково-питающих систем: Учеб. Пособие / Н.Н.Зонненберг. – Самара. - 2004. – С. 40.
120. Иванов В. Н. Литье по выплавляемым моделям [текст] / В.Н. Иванов, С.А. Казеннов, Б.С. Курчман и др.; под общ. ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. – 3 изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. - 1984. – С. 408.
121. Nikitin K. V. Improving the Casting Process in Ceramic Forms Using Additive Technologies in Manufacturing Model Kits [текст] / K.V. Nikitin, B.N. Tukabayov, V.N. D'yachkov, V.I. Nikitin, V.B. Deev, A.Yu. Barinov // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals.* – 2021. - Vol. 62. - No. 6. - pp. 675–681.
122. Никитин К.В. Инновации в литье по выплавляемым моделям [текст] / К.В. Никитин, А.В. Соколов, В.И. Никитин, В.Н. Дьячков // Самара: Самарский научный центр РАН. – 2017. – С. 144.



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по ИТ СамГТУ

Ненашев М.В.

2023 г.



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ ТИ-ЛВТ-9
РЕЦИКЛИРОВАНИЕ СЫПУЧЕЙ СТРУЖКИ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ
СИСТЕМЫ Al-Si

Разработали:

д.т.н., профессор,

заведующий кафедрой «ЛиВТ

инженер ЦЛТ, ассистент кафедры «ЛиВТ»

Никитин К.В.

Биктимиров Р.М.

Самара, СамГТУ 2023



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
 федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
 образования
 «Самарский государственный технический университет»
 (ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по ИР СамГТУ
 Ненашев М.В.
 2023 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ ТИ-ЛВТ-10
РЕЦИКЛИРОВАНИЕ ВЬЮНООБРАЗНОЙ СТРУЖКИ
ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМ Al-Mg, Al-Cu

Разработали:

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «ЛиВТ»  Никитин К.В.

инженер ЦЛТ, ассистент кафедры «ЛиВТ»  Биктимиров Р.М.

Самара, СамГТУ 2023



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
 федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
 образования
 «Самарский государственный технический университет»
 (ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

УТВЕРЖДАЮ:
 Ректор по ИР СамГТУ
 Ненашев М.В.
 2023 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ ТИ-ЛВТ-11
ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕЛКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПРУТКОВОГО
ПРИПОЯ А34

Разработали:

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «ЛиВТ»

инженер ЦЛТ, ассистент кафедры «ЛиВТ»

Никитин К.В.

Биктимиров Р.М.

Самара, СамГТУ 2023

Закрытое акционерное общество Производственная фирма «Плавка и пайка»
Юридический адрес: 117403, Москва, Востряковский проезд, дом 25, корпус 1, квартира 174.
Фактический и почтовый адрес: 117105, Москва, Нагатинская улица, дом 3А, строение 5, комн. 15.
 ИНН 7737532232\КПП 772401001. ОКВЭД 20.5.59. ОКПО 87529640. ОГРН
 1087746783981. ОКАТО 45296555000, ОКТМО 45912000, ОКГУ 4210014,
 ОКФС/ОКОПФ 16/19000, БИК 044525411. Кор.сч. 301 01 810 1452 5000 0411.
 Расч. сч. 407 02 810 4018 6000 0298. Филиал «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ» Банка ВТБ ПАО, с.
 Москва. Многоканальный телефон\факс: +7 (495) 223-27-98, +7 (495) 662-67-93,
 +7 (929) 628-64-02. e-mail: gumboils@mail.ru, e-mail: 2232798@mail.ru, сайты:
www.gumboils.ru, www.rosflus.ru, www.mosflus.ru

АКТ
 передачи продукции по договору
 № 214/21 от 13.09.2021 г.

Согласно договору № 214/21 от 13.09.2021 г. поставщиком в лице ФБГОУ ВО «СамГТУ» за период февраль 2022 г. по май 2023 г. была изготовлена и поставлена продукция в виде припоя А34 в количестве 1500 кг.

По результатам входного контроля поставленная продукция полностью соответствовала предъявляемым к ней требованиям по качеству. На основании результатов входного контроля продукция была допущена к дальнейшему использованию.

Генеральный директор
 ЗАО ПФ «Плавка и пайка»



Вострикова Л.В.



МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ
 федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
 образования
 «Самарский государственный технический университет»
 (ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по ИР СамГТУ

Ненашев М.В.

2023 г.



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ ТИ-ЛВТ-12
СИНТЕЗИРОВАНИЕ СПЛАВА АК7ч С ПРИМЕНЕНИЕМ
ДЕФОРМИРОВАННЫХ ОТХОДОВ

Разработали:

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «ЛиВТ»

Никитин К.В.

инженер ЦЛТ, ассистент кафедры «ЛиВТ»

Биктимиров Р.М.

Самара, СамГТУ 2023

Исполнитель:
 ФГБОУ ВО «СамГТУ»,
 РФ, 443100, г. Самара,
 ул. Молодогвардейская, д.244
 ИНН 6315800040, КПП 631631001,
 Банк получателя: Отделение Самара Банка
 России/УФК по Самарской области г.
 Самара
 р/с 03214643000000014200,
 корр/счет 40102810545370000036, БИК
 013601205
 Получатель: УФК по Самарской области,
 (НИЧ ФГБОУ ВО «СамГТУ» л/с
 20426Х73200), ОКПО 48122646, ОКТМО
 36701330, ОГРН 1026301167683

Заказчик:
 АО «Авиаагрегат»
 443009, Самарская область, г. Самара,
 Заводское ш., д.55
 ИНН 6319031396
 КПП 631901001
 Банк получателя: Поволжский Банк ПАО Сбербанк
 р/с 40702810354400006025
 к/с 3010181102000000607
 БИК 043 601 607, ОГРН 1026301708575
 ОКПО 07512714, ОКАТО 73921203617
 ОКОПФ 93765, ОКОГУ 5900726

АКТ
 сдачи-приемки работ по договору № 214/22 от 15.09.2022 г.

составлен « 13 » 12 2022 г.

Наименование работы «Разработка и изготовление опытной партии алюминиевых отливок способом литья в огнеупорные керамические формы»

Мы нижеподписавшиеся, представитель Исполнителя первый проректор-проректор по НР СамГТУ Ненашев М.В., с одной стороны и представитель Заказчика, и генеральный директор Гараев Д.С., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что по договору выполнены следующие виды работ:

1. Анализ и согласование конструкции и элементов литниково-питающих систем отливок по номенклатуре 3-й очередности.
2. Разработаны чертежи, управляющие программы и изготовлены средствами 3D-печати модели выжигаемых отливок.
3. Изготовлены огнеупорные керамические формы и опытные образцы отливок 3-й очередности из сплава АК7ч.
4. Изготовленные опытные образцы отливок в указанных количествах переданы Заказчику по акту передачи.

Договорная цена договора составляет 5 348 550 (Пять миллионов триста сорок восемь тысяч пятьсот пятьдесят) руб. 00 коп., без НДС (Гл. 21 НК РФ ст.149 п.3 п.п.16).

Выполнено работ по данному акту на сумму 3 010 759 (Три миллиона десять тысяч семьсот пятьдесят девять) руб. 50 коп., без НДС (Гл. 21 НК РФ ст.149 п.3 п.п.16).

Перечислено по данному акту: 0 руб.

Следует к перечислению 3 010 759 (Три миллиона десять тысяч семьсот пятьдесят девять) руб. 50 коп., без НДС (Гл. 21 НК РФ ст.149 п.3 п.п.16).

Работу сдаю
 от Исполнителя

Работу принял
 от Заказчика

Первый проректор-проректор по НР СамГТУ

Генеральный директор



Исполнитель:

ФГБОУ ВО «СамГТУ»,
РФ, 443100, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, д.244
ИНН 6315800040, КПП 631631001,
Банк получателя: Отделение Самара Банка
России/УФК по Самарской области г.
Самара
р/с 03214643000000014200,
корр/счет 40102810545370000036, БИК
013601205
Получатель: УФК по Самарской области,
(НИЧ ФГБОУ ВО «СамГТУ» л/с
20426Х73200), ОКПО 48122646, ОКТМО
36701330, ОГРН 1026301167683

Заказчик:

АО «Авиаагрегат»
443009, Самарская область, г.Самара,
Заводское ш., д.55
ИНН 6319031396
КПП 631901001
Банк получателя: Поволжский Банк ПАО Сбербанк
р/с 407028103544000006025
к/с 30101811020000000607
БИК 043 601 607, ОГРН 1026301708575
ОКПО 07512714, ОКАТО 73921203617
ОКОПФ 93765, ОКОГУ 5900726

АКТ

сдачи-приемки работ по договору № 214/22от 15.09.2022 г.

составлен «19»ноября2022 г.

Наименование работы: «Разработка и изготовление опытной партии алюминиевых отливок способом литья в огнеупорные керамические формы»

Мы нижеподписавшиеся, представитель Исполнителя первый проректор-проректор по НР СамГТУ Ненашев М.В., с одной стороны и представитель Заказчика, и генеральный директор Гараев Д.С., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что по договору выполнены следующие виды работ:

1. Анализ и согласование конструкции и элементов литниково-питающих систем отливок по номенклатуре 1 и 2- й очередности.
2. Разработаны управляющие программы и изготовлены средствами 3D-печати модели выжигаемых отливок.
3. Изготовлены огнеупорные керамические формы и опытные образцы отливок из сплава АК7ч: АА.95N.00.4201.204.001 – 1 шт.; АА.95N.00.4201.204.002 – 1 шт.; АА.95N.00.4201.212 – 1 шт.; АА.95N.00.4201.203 – 3 шт.; АА.95N.00.4201.401 – 3 шт.; АА.95N.00.4201.235.001 – 3 шт.; АА.95N.00.4201.235.002 – 1 шт.; АА.95N.00.4116.001 – 2 шт.; АА.95N.00.4116.002 – 1 шт.; АА.95N.00.4201.244 – 3 шт.
4. Изготовленные опытные образцы отливок в указанных количествах переданы Заказчику по акту передачи.

Договорная цена договора составляет 5 348 550 (Пять миллионов триста сорок восемь тысяч пятьсот пятьдесят) руб. 00 коп., без НДС (Гл. 21 НК РФ ст.149 п.3 п.п.16).

Выполнено работ на сумму 2 337 790 (Два миллиона триста тридцать семь тысяч семьсот девяносто) руб. 50 коп.

Перечислено по договору: 1 604 565 (Один миллион шестьсот четыре тысячи пятьсот шестьдесят пять) руб. 00 коп.

Следует к перечислению 733225 (Семьсот тридцать три тысяч двести двадцать пять) руб. 50 коп., без НДС (Гл. 21 НК РФ ст.149 п.3 п.п.16).





МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор-



проректор по научной работе
Самарского государственного
технического университета,
д.т.н., профессор
М.В. Менашев
_____ 20 ____ года

АКТ

использования материалов диссертационного исследования
Биктимирова Рината Маратовича

Настоящим актом подтверждается, что в 2022-2023 гг. в Центре литейных технологий кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» Самарского государственного технического университета были изготовлены партии алюминий-кремниевых литейных сплавов марок АК7ч и припойного сплава марки А34 с использованием рециклируемых металлических отходов. В основу технологий приготовления сплавов были положены разработки Биктимирова Р.М., полученные в процессе диссертационного исследования.

Сплавы были изготовлены в рамках выполнения договоров с предприятиями реального сектора экономики: АО «АВИААГРЕГАТ» (г. Самара) договор № 214/22 от 15.09.2022 г., ЗАО ПФ «Плавка и пайка» (г. Москва) договор № 214/21 от 13.09.2021 г.

Из сплавов, синтезированных с использованием рециклируемых отходов, получены пилотные партии отливок аэрокосмического назначения и полупромышленные партии пруткового припоя. Изготовленные литые изделия прошли входной контроль у заказчиков и были допущены в дальнейшее производство предприятий.

Научные результаты диссертационного исследования Биктимирова Р.М. были упомянуты в научном сообщении на сайте МИНОБРНАУКИ РФ (<https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/63579/>).

Заведующий кафедрой «Литейные
и высокоэффективные технологии»,
декан ФММТ «СамГТУ»,
д.т.н., профессор

К.В. Никитин