

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

БИКТИМИРОВ РИНАТ МАРАТОВИЧ

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

Специальность 2.6.3 – Литейное производство

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
Доктор технических наук, профессор  
Никитин Константин Владимирович

Москва – 2025

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 синтеза 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* переplava 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 ГОСТ 1583-93 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 изготовлены 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 153 страницах (включая приложения), содержит 59 рисунков, 38 таблиц, а также список литературы из 122 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

### **Глава 1. Состояние вопроса. Постановка целей и задач исследования.**

Приведен обзор литературных данных, показывающий актуальность разработки технологий рециклирования металлических отходов и получения из них качественных рабочих сплавов на основе алюминия и литых изделий.

Решению задач по рациональному использованию различных ломов и отходов на основе алюминия посвящены работы российских ученых: Г.С. Макарова, И.Г. Бродовой, В.Ю. Бажина, В.Э. Ибрагимова, Н.Н. Загирова, В.Р. Абалымова, И.Ф. Селянина, В.Б. Деева, Гаврилина И.В., В.А. Кечина и др. Большое внимание вопросам управления структурообразованием в алюминиевых сплавах уделяется в работах В.Б. Деева, А.И. Батышева, К.А. Батышева, Ри Хосена, Э.Х. Ри, В.И. Никитина, К.В. Никитина, И.Ю. Тимошкина.

По-прежнему актуальным направлением остаются системные исследования по получению алюминиевых сплавов с максимально возможным вовлечением

алюминиевых отходов в составы шихт при обеспечении гарантированного уровня качества литых изделий различного назначения.

На основании анализа научной литературы сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

**Глава 2. Методика исследования.** Исследования проводили по схеме, которая позволила обеспечить преемственность и развитие ранее выполненных работ, оценить наследственное влияние рециклируемых ломов и отходов в системе «твердое-жидкое-твердое», определить наиболее рациональные технологические решения для получения качественных литых изделий. 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.

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

Лигатуры готовили в индукционной тигельной печи марки УИП-001 в графитовом тигле емкостью 10 кг по Al; сплавы - в тигельных печах сопротивления (графито-шамотные тигли емкостью 10 и 30 кг по Al). Модельные плавки производили в тигельных печах сопротивления GRAFICARBO GF.1100 в графитовых тиглях емкостью 1 кг по Al. Контроль за температурой расплава осуществляли с помощью ХА-термопар 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 и переплавы в виде лент толщиной 1,5-3,0 мм получали в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе, обеспечивая среднюю скорость охлаждения  $v_{\text{охл}} \sim 10^3$  °С/с.

Химический состав сплавов определяли спектральным методом на спектроанализаторе ARL 3460 (АО «Арконик СМЗ», АО «Авиаагрегат»). Газосодержание сплавов определяли методом вакуум-нагрева с масс-спектрометрическим анализатором в динамическом режиме по ГОСТ 211321.1-81 (АО «Арконик СМЗ»). Механические испытания (предел прочности при растяжении  $\sigma_B$  и относительное удлинение  $\delta$ ) 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. Металлографический анализ выполняли с помощью программно-аппаратного

комплекса (ПАК) SIAMS-800. 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 профессором К.В. Никитиным.

Для моделирования гидродинамических и кристаллизационных процессов получения отливок использовали лицензионную систему автоматизированного моделирования литейных процессов (САМ ЛП) LVM Flow (версия 4.6r2).

**Глава 3. Исследование влияния основных параметров рециклирования алюминиевых отходов на качество переплавов.** Проводили исследование различных видов ломов и отходов (табл. 1.). В микроструктуре баночных отходов до переплава в алюминиевой матрице распределена  $\beta$ -фаза  $Al_3Mg_2$ , средний размер которой составляет 1-3 мкм. После переплава  $\beta$ -фаза  $Al_3Mg_2$  сохраняет измельченное состояние и равномерно рассредоточена по границам дендритов  $\alpha-Al$ . В микроструктуре сыпучей стружки сплава АК9ч размеры включений эвтектического Si составляют 0,3-3 мкм. Структура стружки сильно деформирована и вытянута по направлению резания. В микроструктуре витой стружки сплава АМг6 наблюдается деформация  $\beta$ -фазы  $Al_3Mg_2$  по направлению резания. Размеры  $\beta$ -фазы составляют 2-10 мкм. В микроструктуре витой стружки сплава Д16 заметна деформация  $\theta$ -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. Электротехнические лома алюминия и меди в процессе своего генезиса также испытывали комплекс деформационно-термических воздействий. Соответственно, с позиции явления структурной наследственности (ЯСН) все выше перечисленные лома и отходы можно классифицировать, как специально-обработанные шихтовые материалы, обладающие положительной структурной информацией.

Таблица 1 – Виды исследованных 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	АК9ч (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	АМг6 (Al-Mg-Mn)	A23	
6	A7 (Al)	A2	Электротехнические лома алюминия в виде проволоки диаметром 2-5 мм
7	M1 (Cu)	M7	Электротехнические лома меди в виде проволоки диаметром 2-5 мм

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

Коэффициент вероятного засора баночных отходов  $i_B$  был определен по формуле:

$$i_B = (p_i \times i_m)/100, \quad (1)$$

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

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

$$I_B = i_B + v_1, \quad (2)$$

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

Общую загрязненность стружки  $I_C$  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 и стружки  $k_{ч}$  определяли по формуле:

$$k_{ч} = 1 - \frac{I}{100}, \quad (3)$$

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

Максимальное извлечение металла (критерий  $M_{Me}$ ) при переплаве можно определить по формуле:

$$M_{Me} = \frac{M_{п}}{M_{о}} \times k_{ч}, \quad (4)$$

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

Исходя из 1-4, выход годного при рециклинге алюминиевых отходов не может быть выше значения  $k_{ч}$  для определенного вида отходов.

Дополнительной качественной характеристикой рециклирования является критерий контакта отходов с атмосферой  $k_A$  ( $\text{мм}^{-1}$ ):

$$k_A = S/V, \quad (5)$$

где  $S$  – площадь поверхности отхода,  $\text{мм}^2$ ;  $V$  – объем отхода в некомпактированном виде,  $\text{мм}^3$ .

На основании вышеприведенных качественных критериев выполнили ранжирование каждого вида отходов: чем выше балл, тем более высокую качественную характеристику имеет определенный вид отхода (табл. 2).

Таблица 2 - Критерии качества рециклируемых алюминиевых отходов

Вид отхода	Средний размер вторичных фаз, мкм	$k_{\text{ч}}$	$k_{\text{А}}, \text{мм}^{-1}$	$M_{\text{Ме}}$	Балл
Баночный лом 3104	2,0	0,91	19,3	0,86	4-5
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 стружку сплава АК9ч: средний размер вторичных фаз 0,3-3 мкм,  $k_{\text{ч}} = 0,955$ ,  $k_{\text{А}} = 10-15 \text{ мм}^{-1}$ ,  $M_{\text{Ме}} = 0,94$  (табл. 2). Равное количество баллов у стружки сплавов АМг6 и Д16 обусловлено получением более высоких показателей по нескольким критериям. Для стружки Д16 критерий  $k_{\text{А}}$  оказался в 10 раз больше, чем у других отходов из-за малой толщины стружки (0,02 мм). Критерий  $M_{\text{Ме}}$  для обоих видов стружки составил 0,92. Критерий  $k_{\text{ч}}$  для стружки сплава АМг6 – 0,99. Наименее качественным шихтовым материалом по совокупности критериев являются баночные лома:  $k_{\text{ч}} = 0,91$ ,  $k_{\text{А}} = 19,3 \text{ мм}^{-1}$ ,  $M_{\text{Ме}} = 0,86$ .

Исследовали влияние параметров прямого переплава на металлургический выход годного (МВГ) и структуру предварительного сплава АК9ч. Под прямым переплавом понимали приготовление предварительного сплава только с использованием стружки (без легирующих и модифицирующих добавок). Для исследований использовали следующие материалы: мелкая (сыпучая) стружка сплава АК9ч после обработки кокильных отливок (рис. 1, а); крупная (хлопьевидная) стружка сплава АК9ч после обработки отливок, полученных литьем в песчано-глинистые формы (рис. 1, б); брикетированная (спрессованная) стружка сплава АК9ч в соотношении 50/50 мелкой и крупной стружек (рис. 1, в).



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

Рисунок 1 – Внешний вид стружки из сплава АК9ч

Стружка, образующаяся в процессе механической обработки кокильных отливок, характеризуется измельченными кристаллами  $Si_3$  и дендритами  $\alpha-Al$ . В микроструктуре крупной стружки, образовавшейся в процессе механической обработки ПГФ-отливок, присутствуют единичные кристаллы  $Si_{II}$ .

Исследовали эффективность отдельных переделов небрикетированных стружек по 4-м технологическим схемам: передел на «болоте» (30, 40 и 50% от массы плавки); передел в расплавленной комплексной флюсовой композиции (КФК) «Эвтектика» (5, 10 и 15% сверх массы плавки); передел смеси «стружка+флюс» (20% КФК сверх массы плавки); комплексный передел на «болоте» смеси «стружка+флюс». Самый низкий металлургический выход годного (МВГ) был установлен при переделе мелкой стружки в расплаве КФК – 82%. Самый высокий – при переделе крупной стружки в расплаве КФК – 99%. В экспериментах по варьированию доли «болота» и расплава КФК было установлено, что более высокие значения МВГ достигаются при переделе крупной стружки. В данном случае влияние оказывает размерный фактор стружки, который был определен, как критерий контакта отходов с атмосферой  $k_A$  (5). Брикетированную стружку переделывали по 2-м технологическим схемам: передел на «болоте»; передел под слоем КФК. При переделе брикетированной стружки повышенный МВГ (96%) установлен при ведении плавки на «болоте» по сравнению с переделом под слоем КФК (94%). На основании анализа полученных результатов была опробована комплексная технологическая схема передела стружки, базирующаяся на основных преимуществах опробованных схем. Металлургический выход годного металла при комплексной технологической схеме передела стружки сплава АК9ч составил 95-97%. Микроструктура сплава – однородная, мелкозернистая. Химический состав промежуточного сплава соответствует требованиям ГОСТ 1583-93 для марочного сплава АК9ч.

При разработке технологических схем передела вьюнообразной стружки из деформируемого сплава АМг6 учитывали следующие особенности: высокие значения критерия  $k_A$  и повышенный угар магния, как основного легирующего элемента сплава. Готовили расплав из кусковых отходов (профили, листы, обрезь) сплавов системы Al-Mg (АМг5, АМг6) под слоем карналлитового флюса. Предварительно очищенную вьюнообразную стружку АМг6 раскладывали по чугунным изложницам и заливали расплавом, получая композицию «сплав-стружка». Далее полученную композицию переделывали под слоем флюса и разливали по изложницам. Суммарный МВГ по разработанной технологической схеме составил 93-95%. Анализ химического состава полученного передела

показал, что из предварительного сплава можно приготовить деформируемые сплавы АМг6 и АМг5. В структуре предварительного сплава отсутствовали шлаковые и другие инородные включения, макро- и микропористость.

Микроструктуры предварительных сплавов АК9ч и АМг6 представлены на рисунке 2.

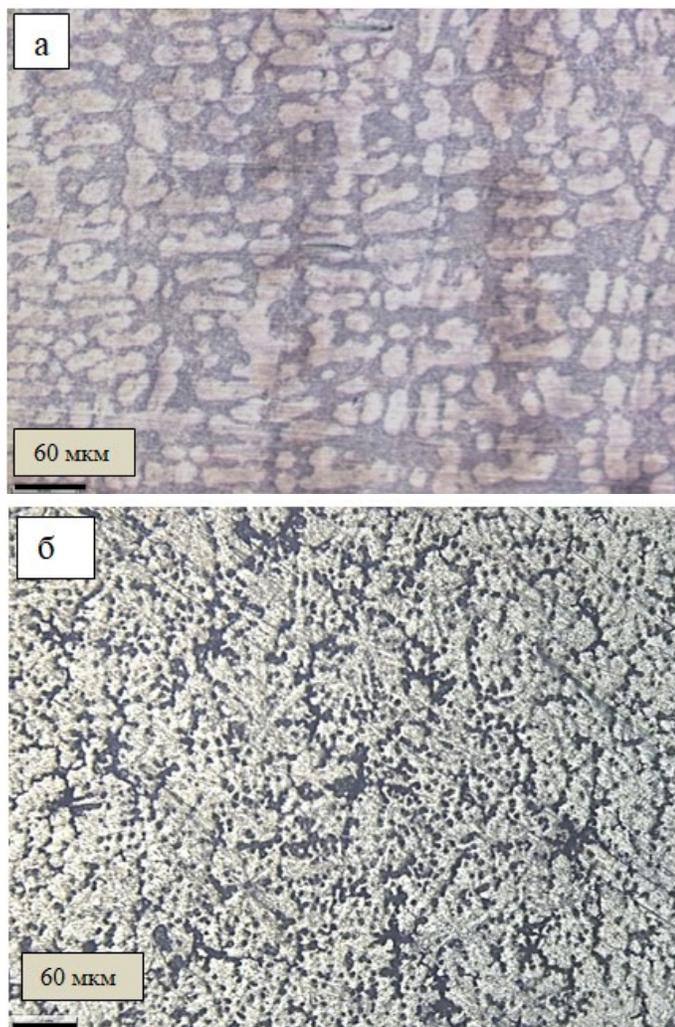


Рисунок 2 – Микроструктура предварительных сплав АК9ч (а) и АМг6 (б)

По результатам исследований 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».

#### Глава 4. Исследование влияния вида и количества отходов на структуру и свойства синтезированных сплавов на основе алюминия.

Синтезирование сплавов выполняли с учетом разработанных критериев качества ломов и отходов (1-5). Шихтовые материалы, использованные для синтеза сплавов, представлены в таблице 3. Химические составы синтезированных сплавов по основным и примесным элементам соответствовали требованиям нормативной документации.

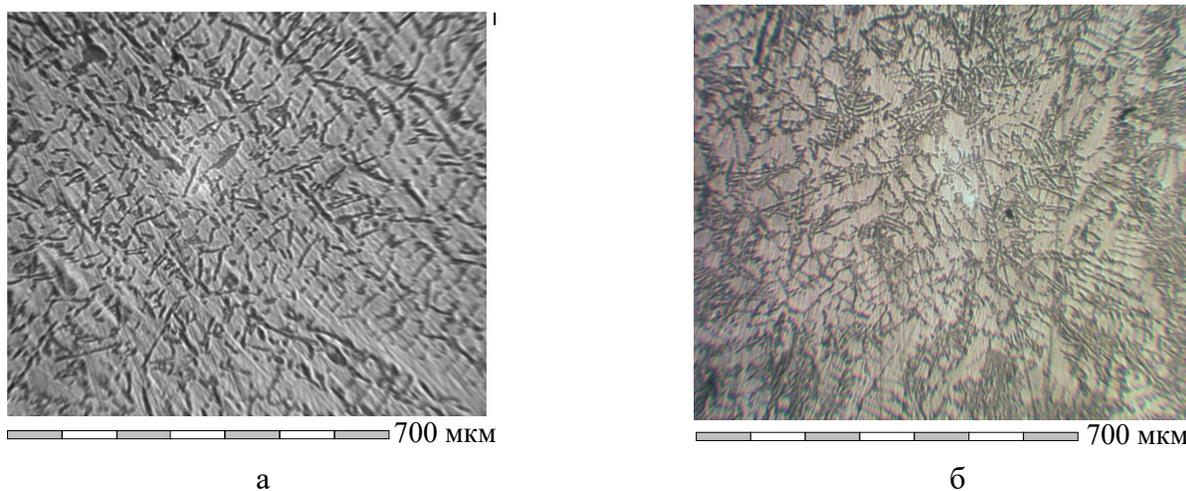
Таблица 3 - Шихтовые материалы для приготовления промежуточных сплавов

Марка сплава	Вид шихтового материала									
	Баночный лом	Стружка			Электро-технические отходы		Лигатуры			Магний Mg90
		АК9ч	Д16	АМг6	Al	Cu	AlSi20	ATi5	AlSc2	
АК7ч	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-
АК12	+	-	-	-	+	-	+	-	-	-
АК6М2	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-
АМг5	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+

Образцы для исследований из литейных сплавов (АК7ч, АК12, АК6М2) получали заливкой в кокиль; из деформируемого сплава (АМг5) – литьем погружением на специальной установке. МВГ варьировался в диапазоне 82÷96 % в зависимости от марки синтезированного сплава, а также от вида использованных ломов и отходов. Самый низкий выход годного был установлен для сплава АК12, при синтезировании которого доля баночных отходов составляла ~ 80%. Полученные данные по выходу годного достаточно хорошо коррелируют с установленными критериями качества для данного вида отходов. Установлены зависимости содержания водорода, плотностей в жидком и твердом состояниях и электропроводности от марки синтезированного сплава. Самое высокое содержание водорода (0,37 см<sup>3</sup>/100 г Ме) установлено для сплава АК12, полученного с использованием в составе шихты баночного лома. Это связано с тем, что баночный лом характеризуется высоким значением критерия  $k_A$  (19,3 мм<sup>-1</sup>) и низким значением критерия чистоты  $k_C$  (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. Самое низкое содержание водорода получено для сплава АК6М2 (0,28 см<sup>3</sup>/100 г Ме). В качестве одного из легирующих компонентов в сплаве АК6М2 присутствует титан, который является геттером для водорода, связывая его в устойчивые гидриды. Испытания механических свойств показали, что синтезированные сплавы имеют гарантированный запас прочности и пластичности по сравнению с требованиями нормативной документации. 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 отходов в сочетании с модифицированием показано, что обеспечивается получение сплава с хорошей склонностью к деформационной обработке: на образцах из немодифицированного сплава трещины появились после 10-го прохода; образцы из модифицированного сплава выдерживали 12 проходов; степень деформации по толщине образцов из немодифицированного сплава составила 60,5%; для модифицированных – 67,2%.

Исследовали влияние деформированных отходов в составе шихты на эффективность модифицирования сплавов АК9ч и АМг6л добавками

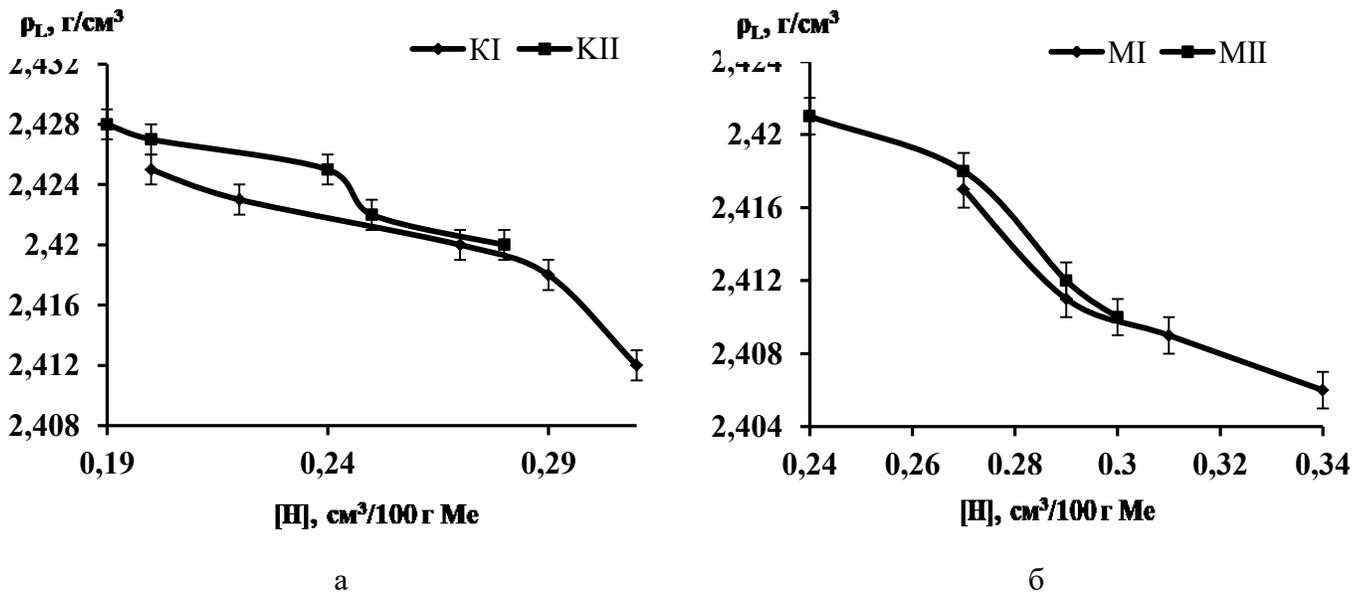
микрокристаллических лигатур  $AlSr_{10}$  и  $AlTi_5$ . Составы шихт по 1-му варианту включали в себя чушковые шихтовые материалы и литой возврат собственного производства в виде прибыльных частей литниково-питающих систем ПГФ-отливок. В составы шихт по 2-му варианту вместо литого возврата были введены деформированные отходы (Д-шихта): лом электротехнического алюминия (вместо чушкового); баночный лом (для АК9ч); деформированные отходы сплава АМг6 (для АМг6). Использование Д-шихты обусловило измельчение основных структурных составляющих сплавов до модифицирования (рис. 3).



а, б – 1 и 2 составы шихт, соответственно  
 Рисунок 3 - Микроструктура опытного сплава АК9ч до модифицирования

Модифицирование сплавов микрокристаллическими лигатурами (АК9ч -  $AlSr_{20}$ ; АМг6 -  $AlTi_5$ ) выявило следующие общие тенденции не зависимо от состава шихты: снижается содержание водорода в сплавах; повышается плотность в жидком и твердом состояниях; измельчаются микро- (АК9ч) и макро-структура (АМг6); увеличиваются предел прочности при растяжении и относительное удлинение. При практически одинаковых химических составах сплавов, полученных по обоим вариантам шихт, лучшими показателями характеризовались сплавы, приготовленные с использованием Д-шихты. Максимальные механические свойства в сплавах, приготовленных с использованием Д-шихты, достигались при меньших количествах вводимых лигатур: 0,06% по стронцию (АК9ч) и 0,04% по титану (АМг6). 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 (рис. 4).

Введение в состав шихты деформированных отходов вместо крупнокристаллического возврата собственного производства в виде прибыльных частей отливок обуславливает формирование более измельченной структуры рабочих сплавов АК9ч и АМГбл. Влияние Д-шихты сохраняется и при модифицировании сплавов лигатурами AlSr20 (АК9ч) и AlTi5 (АМГбл). 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».



а – АК9ч; б – АМГб

Рисунок 4 - Влияние содержания водорода на плотность сплавов в жидком состоянии в зависимости от состава шихты

Исследовали возможность получения качественных рабочих сплавов АК9ч, АК12 и АМГбл с использованием максимального количества отходов. Сплав АК9ч готовили с вовлечением баночных ломов (3104) и электротехнического алюминия; АК12 – лома бутылок (АД0) и банок (3104); АМГбл – лома электротехнического алюминия и деформированных отходов (АМГ5). Установлено, что при использовании до 100% (АК9ч), 83% (АК12) и 92,5% (АМГбл) отходов возможно получение рабочих сплавов, соответствующих по химическому составу и с гарантированным запасом уровня механических свойств относительно ГОСТ 1583-93. На примере сплава АК9ч было показано, что экономное модифицирование добавками микрокристаллического переплава (МКП) в количестве 1,5% (по массе)

оказывает такое же воздействие на структуру и свойства, как и применение лигатуры AlSr10.

### Глава 5. Опытнo-промышленная апробация результатов исследования.

По заказу ЗАО ПФ «Плавка и пайка» (г. Москва) освоено производство литого припоя А34 (система Al-Cu-Si) в виде прутка. Требования заказчика к сплаву А34 и припою приведены в таблице 4.

В качестве шихтовых материалов использовали: лом алюминия и меди электротехнический, вьюнообразную стружку деформируемого сплава Д16, синтезированный предварительный сплав АК12 (кристаллизация в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе), микрокристаллический переплав А34 (кристаллизация в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе).

Таблица 4 – Требования к сплаву и припою А34

К сплаву			К припою		
$T_L/T_S, ^\circ\text{C}$	Размер $Si_p$ , мкм (не более)	Механические свойства, не менее		Габариты (d×l), мм	Дополнительные
		$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %		
525/525 ( $\pm 1^\circ\text{C}$ )	10	240	1,5	4,5×200	Возможность сварки
				3,0×400	

По разработанной технологической схеме получали припойный сплав А34, который по химическому составу и остальным параметрам соответствовал требованиям ОСТ 4Г 0.033.200 и заказчика. Разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-11 «Изготовление мелкокристаллического пруткового припоя А34». За период с февраля 2022 г. по май 2023 г. было изготовлено и поставлено заказчику 1500 кг микрокристаллического припоя марки А34.

По заказу АО «Авиаагрегат» (г. Самара) освоили производство отливок из сплава АК7ч. Программа включала в себя 30 позиций деталей. Общее количество отливок – 150 шт. Предварительный сплав АК7ч в виде чушки получали с вовлечением в состав шихты электротехнических ломов алюминия, предварительных сплавов АК9ч и АМг6. Модифицирование рабочего сплава АК7ч осуществляли комплексным микрокристаллическим переплавом (КМКП) на основе АК7ч с повышенным содержанием титана (0,5% по массе). Механические свойства сплава АК7ч определяли на отдельно отлитых образцах литьем по выплавляемым моделям. Разработаны чертежи отливок и литниково-питающих систем, адекватность которых проверяли с использованием САМ ЛП LVMFlow. Отливки получали способом литья по выплавляемым моделям, которые были изготовлены средствами аддитивного

производства по FDM-технологии. В таблице 5 приведены свойства рабочего сплава АК7ч. Видно, что рабочий сплав характеризуется стабильностью структуры и высоким уровнем механических свойств. Химический состав сплава соответствовал требованиям ГОСТ1583-93.

Таблица 5 – Параметры микроструктуры и физико-механические свойства рабочего сплава АК7ч

Параметры микроструктуры, мкм (min-max)		$\rho_s$ , г/см <sup>3</sup> (min-max)	Механические свойства (Т5)*		
$\alpha$ -Al	Si <sub>3</sub>		$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ ,%	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

Все отливки на входном контроле у заказчика подвергались контролю химического состава, механических свойств и рентгенконтролю на выявление скрытых дефектов. По результатам входного контроля все отливки были признаны годными и приняты в дальнейшее производство. Разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-12 «Синтезирование сплава АК7ч с применением деформированных отходов». Выполненные работы подтверждены актом сдачи-приема работ.

#### **Общие выводы по работе.**

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 характеризовался 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 с февраля 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  $\alpha$ -Al 13,2-15,1 мкм; размеры кристаллов Si<sub>3</sub> 10,2-17,2 мкм; плотность сплава в твердом состоянии  $\rho_s$  2,676-2,683 г/см<sup>3</sup>). Механические свойства сплава АК7ч в состоянии Т5 обеспечивают гарантированный запас над минимальными требованиями ГОСТ 1583-93:  $\sigma_b$  – на 47%;  $\delta$  – 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.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих научных изданиях:**

***Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:***

1. Романюк В.В. Результаты исследования качества низкосортных алюминиевых отходов [текст] / В.В. Романюк, В.И. Никитин, ***Р.М. Биктимиров*** // *Металлургия машиностроения*. – 2018. - №6. – С. 24-27.
2. Никитин В.И. Исследование и разработка технологии переплава алюминиевой стружки [текст] / В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин, ***Р.М. Биктимиров***, А.Н. Фролов // *Металлургия машиностроения*. – 2019. - №1. – С. 8-13.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Никитин К.В. Разработка технологии и изготовление отливок из синтезированного сплава АК7ч литьем по выплавляемым моделям [текст] / К.В. Никитин, ***Р.М. Биктимиров***, И.Ю. Тимошкин, В.Н. Дьячков // *Литейщик России*. - 2023. - №9. - С. 14-20.
8. Биктимиров Р.М., Никитин К.В., Тимошкин И.Ю. Комплексное влияние строения лигатур алюминий – кремний и алюминий – титан на структуру и свойства сплава системы Al – Si – Mg [текст] / ***Р.М. Биктимиров***, К.В. Никитин, И.Ю. Тимошкин // *Цветные металлы*. - 2023. - №9. – С. 62-68.

**Статьи в научных изданиях, рецензируемых в базе SCOPUS:**

9. Nikitin V.I. Synthesis of Aluminum Alloys from Dispersed Waste Based on Aluminum [текст] // V.I. Nikitin, K.V. Nikitin, I. Yu. Timosckin, **R. M. Biktimirov**, // Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2020 - Vol. 61. - No. 6. - P. 632–640.
10. K.V. Nikitin. Hereditary Influence of Deformed Waste on the Efficiency of Modification of Alloy Systems Al–Si–Mg and Al–Mg [текст] // K.V. Nikitin, V.I. Nikitin, I. Yu. Timoshkin, **R.M. Biktimirov**, A.P. Novikov // Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2022 - Vol. 63. - No. 4. - P. 400–408.

**Статьи в других изданиях:**

11. Никитин В.И. Влияние способа рециклирования стружки на качество алюминиевого сплава [текст] / В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин, **Р.М. Биктимиров**, А.Н. Фролов // Труды VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Наследственность в литейно-металлургических процессах". - Самара: Самар. гос. техн. Ун-т, 2018. - С. 306-315.
12. Романюк В.В. Исследование и анализ мелкодисперсных отходов из алюминиевых сплавов [текст] / В.В. Романюк, В.И. Никитин, **Р.М. Биктимиров** // Труды VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Наследственность в литейно-металлургических процессах". - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. - С. 315-323.
13. **Биктимиров Р.М.** Структурно-технологические аспекты рециклинга дисперсных деформированных отходов и синтезирования высококачественных алюминиевых сплавов авиационного назначения [электронный ресурс] / **Р.М. Биктимиров**, И.Ю. Тимошкин, К.В. Никитин // XII Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Современные аспекты в области исследований структурно-фазовых превращений при создании материалов нового поколения». - Москва: ФГУП «ВИАМ». - 2020. - С. 37-51.
14. Тимошкин И.Ю. Наследственность в литых сплавах: лабораторный практикум / И.Ю. Тимошкин, В.И. Никитин, К.В. Никитин, **Р.М. Биктимиров**. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2022. – 46 с.