

СИНТЕЗИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ИЗ ДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

© 2020 г. В.И. Никитин, К.В. Никитин, И.Ю. Тимошкин, Р.М. Биктимиров

Самарский государственный технический университет (СамГТУ), г. Самара

Статья поступила в редакцию 12.05.20 г., доработана 16.06.20 г., подписана в печать 18.06.20 г.

Аннотация: Представлены результаты исследований по синтезированию алюминиевых сплавов систем Al–Si–Mg (AK7ч), Al–Si–Mn (AK12), Al–Si–Cu–Mg (AK6M2) и Al–Mg–Mn (AMr5) с использованием дисперсных отходов: банки из под напитков (система Al–Mn–Mg), опилки литейного сплава (система Al–Si–Mg), витая стружка деформируемых сплавов систем Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn. Изучены микроструктуры отходов в исходном состоянии, определены типичные размеры основных фаз. Определены основные критерии качества рециклируемых отходов: критерии чистоты (k_p), контакта с атмосферой (k_a), максимального извлечения металла (M_{Mc}). На основании предложенных критериев выполнена градация отходов по эффективности рециклирования. Наименьший суммарный балл присвоен баночным отходам, наибольший – опилкам сплава АК9ч. Эксперименты по синтезированию сплавов Al–Si–Mg (AK7ч), Al–Si–Mn (AK12), Al–Si–Cu–Mg (AK6M2) и Al–Mg–Mn (AMr5) показали, что выход годного варьируется от 82 до 96 %. Минимальный выход годного установлен для сплава АК12, в составе шихты которого преобладали баночные отходы. Химические составы сплавов по содержанию основных легирующих и примесных элементов соответствовали требованиям нормативной документации. При испытаниях механических свойств установлено, что синтезированные сплавы имеют гарантированный запас прочности и пластичности по сравнению с требованиями нормативной документации. На основании металлографических исследований выявлено, что в микроструктуре синтезированных сплавов отсутствуют неметаллические включения и газовая пористость. Немодифицированные и модифицированные образцы из сплава Al–Mg–Mn (AMr5) подвергали прокатке в холодном состоянии в несколько проходов до образования трещин. На образце из немодифицированного сплава трещины появились после 10-го прохода. Образец из модифицированного сплава выдержал 12 проходов до образования трещин. Степень деформации по толщине образца из немодифицированного сплава составила 60,5 %, для модифицированного – 67,2 %.

Ключевые слова: алюминиевые отходы, рециклинг, синтезирование сплавов, выход годного, микроструктура, механические свойства.

Никитин В.И. – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Литейные и высокоэффективные технологии» Самарского государственного технического университета (СамГТУ) (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244). E-mail: tlp@samgtu.ru.

Никитин К.В. – докт. техн. наук, проф., декан факультета машиностроения, металлургии и транспорта СамГТУ. E-mail: kvn-6411@mail.ru.

Тимошкин И.Ю. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ. E-mail: ivan-mns@mail.ru.

Биктимиров Р.М. – инженер, ассистент той же кафедры. E-mail: r.biktimirov1995@gmail.com.

Для цитирования: Никитин В.И., Никитин К.В., Тимошкин И.Ю., Биктимиров Р.М. Синтезирование алюминиевых сплавов из дисперсных отходов на основе алюминия. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. No. 5. С. 53–62. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-5-53-62.

Synthesis of aluminum alloys from aluminum-based dispersed waste

V.I. Nikitin, K.V. Nikitin, I.Yu. Timoshkin, R.M. Biktimirov

Samara State Technical University (SSTU), Samara

Received 12.05.2020, revised 16.06.2020, accepted for publication 18.06.2020

Abstract: The paper presents the results of research on the synthesis of Al–Si–Mg (AK7ch), Al–Si–Mn (AK12), Al–Si–Cu–Mg (AK6M2) and Al–Mg–Mn (AMr5) aluminum alloys using dispersed waste: beverage cans (Al–Mn–Mg system), cast alloy sawdust (Al–Si–Mg system), twisted chips of Al–Cu–Mg and Al–Mg–Mn deformable alloys. The waste microstructure was studied in the initial state, and the typical sizes of main phases were determined. The main criteria for the quality of recyclable waste were determined: purity (k_p), contact with the atmosphere (k_a) and maximum metal recovery (M_{Mc}). Based on the proposed criteria, the waste was graded according to recycling efficiency. Can

waste received the lowest total score, and AK9ch alloy sawdust had the highest score. Experiments on the synthesis of Al–Si–Mg (AK7ch), Al–Si–Mn (AK12), Al–Si–Cu–Mg (AK6M2) and Al–Mg–Mn (AMg5) alloys demonstrated that the yield varies from 82 to 96 %. The minimum yield was observed for the AK12 alloy with can waste predominating in the charge composition. The chemical compositions of alloys in terms of the content of the main alloying and impurity elements met the regulatory documentation requirements. Mechanical tests showed that synthesized alloys have a guaranteed margin of strength and plasticity in comparison with regulatory documentation requirements. Metallographic studies revealed that the microstructure of synthesized alloys is free from non-metallic inclusions and gas porosity. Non-modified and modified Al–Mg–Mn (AMg5) alloy samples were subjected to cold rolling in several passes until cracking. The non-modified alloy sample began to crack after the 10th pass. The modified alloy sample withstood 12 passes before cracking. The degree of deformation over the sample thickness was 60.5 % for the non-modified alloy, and 67.2 % for the modified alloy.

Keywords: aluminum waste, recycling, alloy synthesis, yield, microstructure, mechanical properties.

Nikitin V.I. — Dr. Sci. (Eng.), prof., head of the Department of foundry and high-efficiency technologies, Samara State Technical University (SSTU) (443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya str., 244). E-mail: tlp@samgtu.ru.

Nikitin K.V. — Dr. Sci. (Eng.), prof., dean of the Faculty of mechanical engineering, metallurgy and transport, SSTU. E-mail: kvn-6411@mail.ru.

Timoshkin I.Yu. — Cand. Sci. (Eng.), associate prof., Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU. E-mail: ivan-mns@mail.ru.

Biktimirov R.M. — engineer, assistant, Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU.

For citation: Nikitin V.I., Nikitin K.V., Timoshkin I.Yu., Biktimirov R.M. Synthesis of aluminum alloys from aluminum-based dispersed waste. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2020. No. 5. P. 53–62 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-5-53-62.

Введение

В связи с сокращением запасов невозобновляемых природных ресурсов и, как следствие, увеличивающимся дефицитом первичных металлов возрастает актуальность исследований, направленных на повышение доли рециклируемых металлоотходов в металлургическом и литейном производствах. При этом на первое место выходят проблемы обеспечения требуемого качества так называемых «вторичных» сплавов.

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. Так, на долю алюминиевых сплавов в транспортном машиностроении приходится 40–48 % от общего потребления во всех отраслях промышленности [1, 2].

Неуклонно растет потребление алюминиевых сплавов в производстве алюминиевой тары под напитки.

В связи с ростом производства и потребления продукции из алюминиевых сплавов увеличивается доля различных отходов, образующихся как в процессе производства, так и при эксплуатации изделий.

Например, только в 2004 г. в США было рециклировано 51,5 млрд шт. алюминиевых банок [3]. При этом коэффициент извлечения металла составил 51,2 %.

Развитие автомобилестроения также инициирует увеличение количества исследований, направленных на разработку технологий по эффективному рециклингу алюмосодержащих отходов [4, 5]. Это прежде всего связано с тем, что на производство вторичного алюминия и сплавов на его основе, по мнению одних экспертов, затрачивается всего 5 % энергии, требуемой на получение первичного алюминия [6–8]. Из других экспертных оценок известно, что на производство первичного алюминия расходуется около 174 ГДж/т энергии, а на выпуск алюминия из рециклируемых отходов — 20 ГДж/т [9].

Анализ открытых источников информации показывает, что наибольшую долю в процессах вторичной цветной металлургии занимают такие дефицитные металлы, как алюминий и медь, а также сплавы на их основе. Отходы на основе железа, титана, свинца, никеля и т.д. представлены в меньшей степени.

Качество продукции из вторичных алюминиевых сплавов во многом зависит от технологий их приготовления. В первую очередь это касается управления логистическими потоками в процессах сбора и сортировки ломов [10], а также рециклинга [11].

В технологиях получения алюминиевых сплавов из рециклируемых отходов присутствуют, в основном, 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) [3, 8, 12–19].

Следует отметить, что основные исследования направлены на поиск новых решений в технологиях переплава отходов, составов более эффективных реагентов для очистки расплавов от растворимых и нерастворимых неметаллических включений 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) [20–22].

В связи с вышесказанным изучение явления структурной наследственности в технологиях получения качественных алюминиевых сплавов из рециклируемых отходов представляет научный и

практический интерес. Целью настоящей работы являлось исследование влияния вида дисперсных алюминиевых отходов на структуру и свойства сплавов систем Al–Mg и Al–Si.

Материалы и методика экспериментов

Исследования проводили в Центре литейных технологий СамГТУ.

В работе были использованы виды отходов и первичных шихтовых материалов, представленные в табл. 1.

С применением указанных шихтовых материалов синтезировали марочные сплавы на основе алюминия (табл. 2).

Сплавы готовили в печи сопротивления в графитошамотном тигле.

Все отходы предварительно подготавливали к плавке: опилки (АК9ч) и витую стружку (Д16, АМг6) подвергали просушиванию от остатков смазочно-охлаждающей жидкости в сушильном шкафу при температуре $t = 100 \div 150$ °С; витую стружку и баночные отходы прессовали.

Кремний кристаллический использовали для приготовления лигатуры AlSi20 с целью обеспечения требуемого содержания данного элемента в силуминах; стружку АМг6 и магний чушковый — для необходимого содержания магния в сплаве АМг5; стружку Д16 и электротехнические отходы меди — для приготовления сплава АК6М2 с требуемым содержанием меди.

Таблица 1

Основные шихтовые материалы

Table 1. Main charge materials

№ п/п	Марка сплава (система)	Вид, характеристика
1	3104 (Al–Mn–Mg)	Отходы банок под напитки
2	АК9ч (Al–Si–Mg)	Опилки, получаемые при механической обработке отливок, чешуйки
3	Д16 (Al–Cu–Mg)	Витая стружка, получаемая при механической обработке деформированных полуфабрикатов
4	АМг6 (Al–Mg–Mn)	
5	А7 (Al)	Электротехнические отходы алюминия в виде проволоки диаметром 2–5 мм
6	М1 (Cu)	Электротехнические отходы меди в виде проволоки диаметром 2–5 мм
7	Мг90 (Mg)	Магний чушковый
8	AlSi20	Микрокристаллическая легирующая лигатура, полученная кристаллизацией в водоохлаждаемой чугунной изложнице
9	AlSc2	Микрокристаллическая модифицирующая лигатура, полученная кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе
10	AlTi5	

Таблица 2

Химический состав алюминиевых сплавов

Table 2. Chemical composition of aluminum alloys

№ п/п	Марка сплава	Стандарт	Содержание элементов, %						
			Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Fe	Прочие
1	АК7ч		6,0–8,0	<0,2	0,25–0,45	<0,5	<0,15	<0,5	<1,0
2	АК12	ГОСТ 1583-93	10,0–13,0	<0,6	<0,1	0,01–0,5	<0,1	<0,7	<2,1
3	АК6М2		5,5–6,5	1,8–2,3	0,35–0,50	<0,1	0,1–0,2	<0,5	<0,7
4	АМг5	ГОСТ 4784-97	<0,5	<0,1	4,8–5,8	0,3–0,8	0,02–0,1	<0,5	<0,2

Загрузку шихтовых компонентов по расчету осуществляли в предварительно подготовленный расплав из электротехнических отходов алюминия при $t = 720 \div 730$ °С. 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 флюсовую комплексную композицию (ФКК) «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 рафинировали карналлитовым флюсом (ТУ 1714-470-05785388-2011), дегазацию осуществляли аналогично силуминам. Приготовление сплавов выполняли под слоем жидкого флюса. Дегазирующие таблетки вводили в перфорированном стакане на дно жидкой ванны. Обработку расплавов производили при $t = 730 \div 740$ °С.

Силумины заливали при $t = 720 \div 730$ °С 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 $t = 710 \div 720$ °С [23].

Химический состав сплавов определяли спектральным методом на спектроанализаторе ARL 3460 (Thermo Fisher Scientific (Ecublens) SARL, Швейцария). Механические испытания (σ_b — предел прочности при растяжении и δ — относительное удлинение) выполняли на вырезанных образцах в литом состоянии (ГОСТ 1497-84: тип 3 номер 8; тип 5 номер 5) на разрывной машине «Testometric» модели FS150kN-AX (Testometric Company

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

Опытные слитки из сплава АМг5 в литом состоянии подвергали холодной прокатке на лабораторном комбинированном реверсивном стане 300 DIMA (DIMA, Германия). Прокатку осуществляли в несколько проходов до появления трещин на образцах. Степень деформации (%) определяли по формуле

$$\varepsilon = \frac{h_c - h_n}{h_c} \cdot 100, \quad (1)$$

где h_c — толщина слитка, h_n — толщина ленты после 1-го прохода.

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1 представлены микроструктуры дисперсных рециклируемых отходов.

По микроструктуре баночных отходов до переплава (рис. 1, а) видно, что в алюминиевой матрице распределена β -фаза Al_3Mg_2 , средний размер которой составляет 1–3 мкм. После переплава (рис. 1, б) β -фаза Al_3Mg_2 сохраняет измельченное состояние и равномерно рассредоточена по границам дендритов α -Al. В микроструктуре опилок сплава АК9ч (рис. 1, в, г) размеры видимых включений эвтектического Si составляют 0,3–3,0 мкм. Структура опилок сильно деформирована и вытянута по направлению резания. В микроструктуре витой стружки сплава АМг6 (рис. 1, 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. 1, ж, з) также заметна деформация θ -фазы (Al_2Cu)

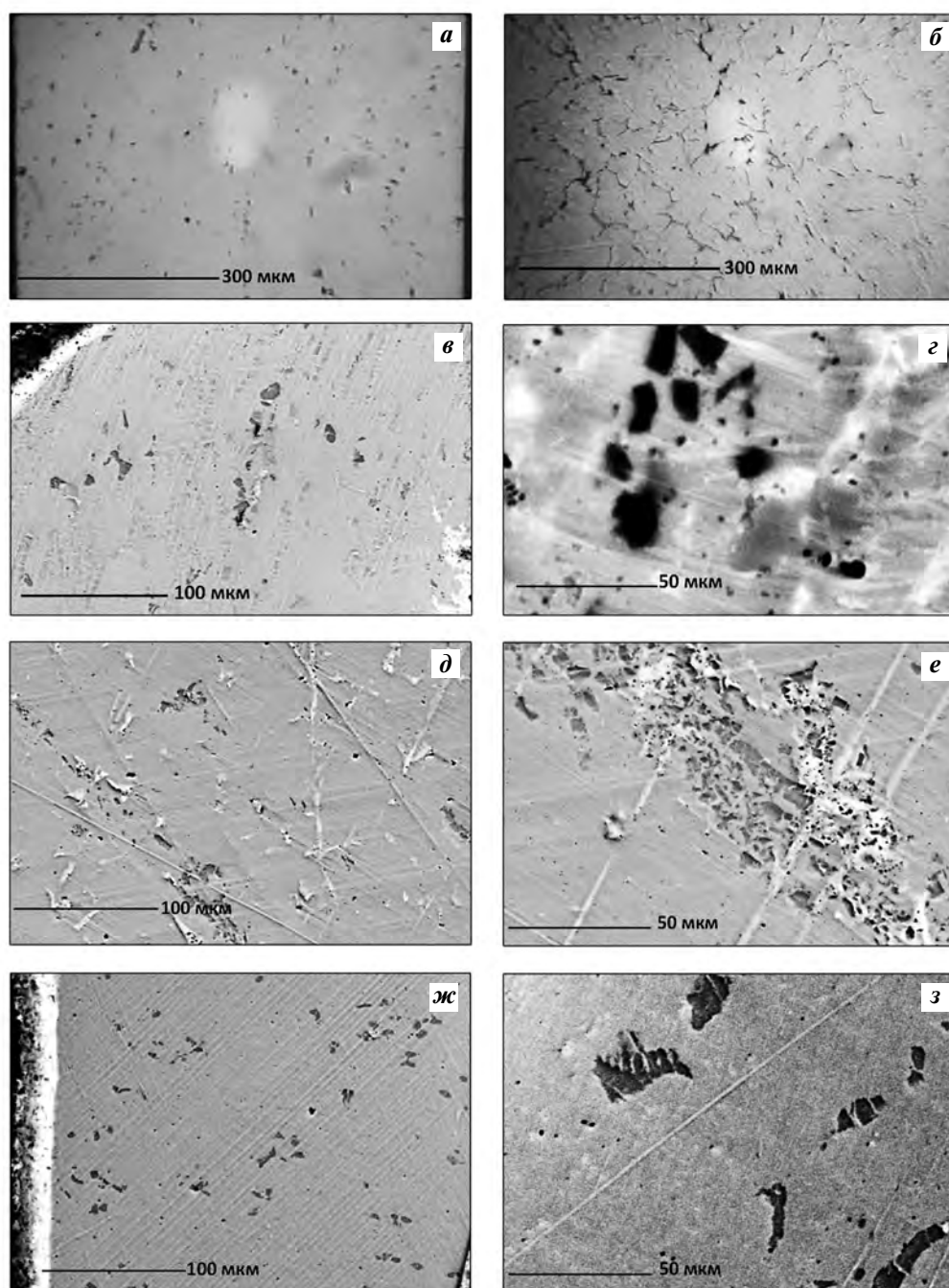


Рис. 1. Микроструктура рециклируемых отходов

а, б – баночные отходы в исходном и переплавленном состояниях соответственно; *в, г* – опилки сплава АК9ч; *д, е* – стружка сплава АМг6; *ж, з* – стружка сплава Д16

Fig. 1. Microstructure of recyclable waste

а, б – can waste in the initial and remelted states, respectively; *в, г* – AK9ch alloy sawdust; *д, е* – AMg6 alloy chips; *ж, з* – D16 alloy chips

по направлению резания, а ее средние размеры составляют 3–8 мкм.

Микроструктура вышеперечисленных отходов характеризуется явно выраженной структурной информацией, заложенной на предыдущих техно-

логических этапах. Так, микроструктура баночных отходов наследует признаки, обусловленные деформационными воздействиями. Данные признаки сохраняются и после однократного переплава. Опилки сплава АК9ч в процессе резания

испытывали деформационное и термическое воздействие. Кроме того, при механической обработке фасонных отливок из литейных сплавов снимается литая корочка, которая имеет мелкокристаллическую структуру. Витая стружка деформируемых сплавов АМгб и Д16 также унаследовала особенности комплексных воздействий: деформационное — в процессе получения полуфабриката; деформационное и термическое — в процессе механической обработки деформированного полуфабриката. Согласно [21], данные отходы можно классифицировать как специально обработанные шихтовые материалы, обладающие положительной структурной информацией.

С целью качественной и количественной характеристики отходов ввели ряд 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.

Коэффициент вероятного засора баночных отходов (%) был определен на основании выборки из 300 банок:

$$i_6 = p_i i_m, \quad (2)$$

где p_i — вероятность наличия засора в банке, %; i_m — средний засор алюминиевой банки, %.

Термическая обработка баночных отходов приводит к потере их массы за счет выгорания лакокрасочного покрытия. В связи с этим общую загрязненность баночных отходов (%) можно вычислить по формуле

$$I_6 = i_6 + v_i, \quad (3)$$

где i_6 — средний вероятный засор алюминиевых банок, %; v_i — потери массы отходов банок после термической обработки, %.

Общую загрязненность опилок и стружки (I_c) определяли следующим образом: отходы взвешивали, промывали в мыльной теплой воде, проводили сушку и снова взвешивали.

Критерий чистоты баночных отходов, опилок и стружки (%) находили следующим образом:

$$k_q = 1 - \frac{I}{100}, \quad (4)$$

где I — общая загрязненность определенного вида отходов (I_6 — банок; I_c — опилок и стружки).

Зная общую загрязненность отходов (неметаллической части), максимальное извлечение метал-

ла (критерий M_{Me}) при переплаве рассчитывали как

$$M_{Me} = (M_{\Pi}/M_o)k_q, \quad (5)$$

где M_{Π} — масса полученного переплава, кг; M_o — масса рециклированных отходов, кг; k_q — критерий чистоты отходов, %.

Таким образом, выход годного при рециклинге алюминиевых отходов не может быть выше значения k_q для определенного вида отходов.

Известно, что 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 (мм^{-1}):

$$k_a = S/V, \quad (6)$$

где S — площадь поверхности отхода; V — объем отхода.

Площадь и объем исследуемых отходов, зная их толщину, габаритные размеры и геометрию, рассчитывали с применением программы КОМПАС-3D LT. Трехмерные модели отходов представлены на рис. 2.

По критерию k_a баночные отходы, опилки АК9ч, стружку Д16 и АМгб можно отнести к дисперсным отходам с развитой удельной поверхностью.

Далее провели отдельный переплав каждого вида отходов. Предварительно подготовленные отходы загружали в расплав электротехнических отходов алюминия при температуре 740–750 °С. Плавку вели под слоем ФКК «Эвтектика». При определении критерия M_{Me} массу электротехнических отходов 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 отходов (табл. 3).

По совокупности критериев качества наиболее качественными отходами можно считать опилки сплава АК9ч: средний размер вторичных фаз 0,3–3,0 мкм, $k_q = 0,955$, $k_a = 17 \div 20 \text{ мм}^{-1}$, $M_{Me} = 0,94$ (см. табл. 3). Равному количеству баллов у стружки сплавов АМгб и Д16 способствовало наличие более высоких показателей по нескольким кри-

Таблица 3

Критерии качества рециклируемых алюминиевых отходов

Table 3. Quality criteria of recyclable aluminum waste

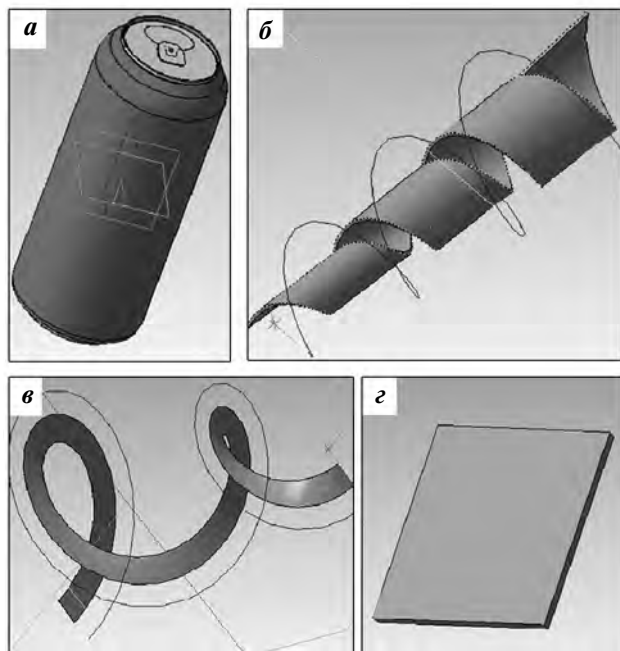
Вид отходов	Средний размер вторичных фаз, мкм	k_q	k_a , мм ⁻¹	M_{Me}	Балл
Баночные отходы 3104	2,0	0,91	19,3	0,86	4–5
Опилки АК9ч	1,65	0,96	17–20	0,94	9
Стружка АМг6	6,0	0,99	10–15	0,92	6
Стружка Д16	5,5	0,94	100–150	0,92	6

Таблица 4

Шихтовые материалы

Table 4. Charge materials

Марка сплава	Вид шихтового материала									
	Баночные отходы	Опилки АК9ч	Стружка		Электротехнические отходы		Лигатуры			Магний Мг90
			Д16	АМг6	Al	Cu	AlSi20	AlTi5	AlSc2	
АК7ч	–	+	–	+	+	–	+	–	–	–
АК12	+	–	–	–	+	–	+	–	–	–
АК6М2	+	–	+	+	+	+	+	+	–	–
АМг5	+	–	–	+	+	–	–	–	+	+

**Рис. 2.** Трехмерные модели исследуемых отходов

a – банка; *б*, *в* – витая стружка сплавов АМг6 и Д16 соответственно; *г* – опилки сплава АК9ч

Fig. 2. Three-dimensional models of waste under study

a – can; *б*, *в* – AMg6 and D16 alloy twisted chips, respectively; *г* – AK9ch alloy sawdust

териям. Для стружки Д16 критерий k_a оказался в 10 раз больше, чем у других отходов из-за небольшой толщины стружки (0,02 мм). Критерий M_{Me} для обоих видов стружки составил 0,92. Критерий k_q для стружки сплава АМг6 – 0,99. Наименее качественным шихтовым материалом по совокупности критериев являются баночные отходы: $k_q = 0,91$, $k_a = 19,3$ мм⁻¹, $M_{Me} = 0,86$.

С учетом выявленных критериев качества синтезировали сплавы (см. табл. 2) на основе алюминия с использованием исследованных рециклируемых отходов. Шихтовые материалы, которые применяли для синтеза сплавов, представлены в табл. 4.

Химические составы синтезированных сплавов по основным и примесным элементам соответствовали требованиям нормативной документации.

Выход годного металла составил 82–96 % в зависимости от марки синтезированного сплава (рис. 3). 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.

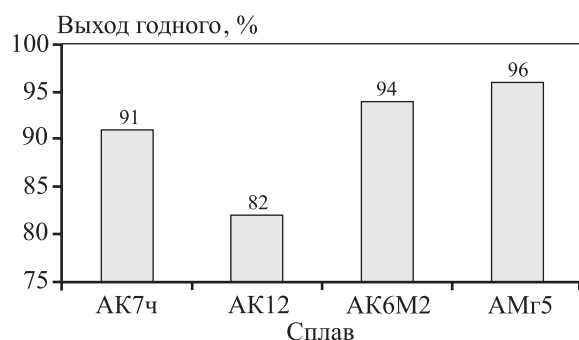


Рис. 3. Выход годного металла в зависимости от марки сплава

Fig. 3. Metal yield depending on the alloy grade

На рис. 4 представлены результаты механических испытаний синтезированных сплавов в литом состоянии.

Свойства сплава АМг5 сравнивали с литейным сплавом марки АМг5Мц (ГОСТ 1583-93), который имеет близкий химический состав.

Испытания механических свойств показали, что синтезированные сплавы имеют гарантированный запас прочности и пластичности по сравнению с требованиями нормативной документации.

На рис. 5 представлены типичные фрагменты микроструктур синтезированных сплавов.

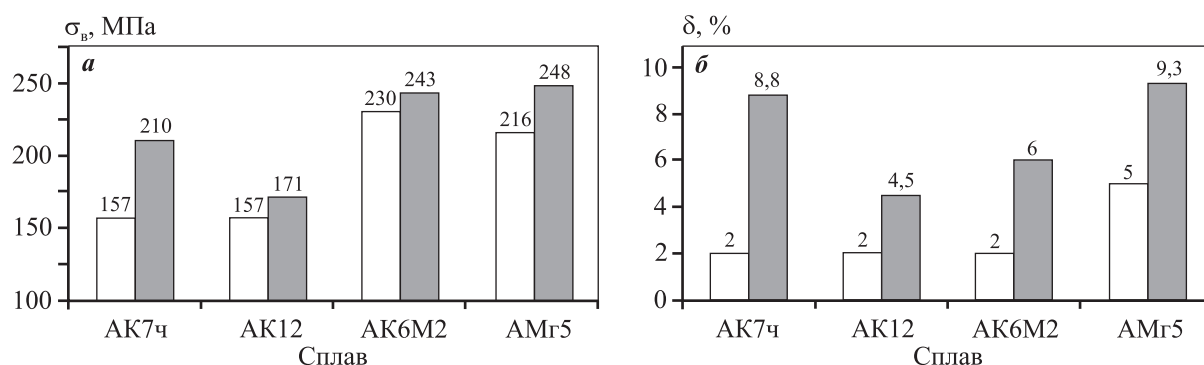


Рис. 4. Механические свойства синтезированных сплавов в литом состоянии

а – предел прочности при растяжении; **б** – относительное удлинение
Светлые столбцы – требования по ГОСТ 1583-93, не менее;
темные столбцы – фактические значения

Fig. 4. Mechanical properties of as-cast synthesized alloys

а – tensile strength; **б** – relative elongation
Light columns – GOST 1583-93 requirements, minimum;
dark columns – actual values

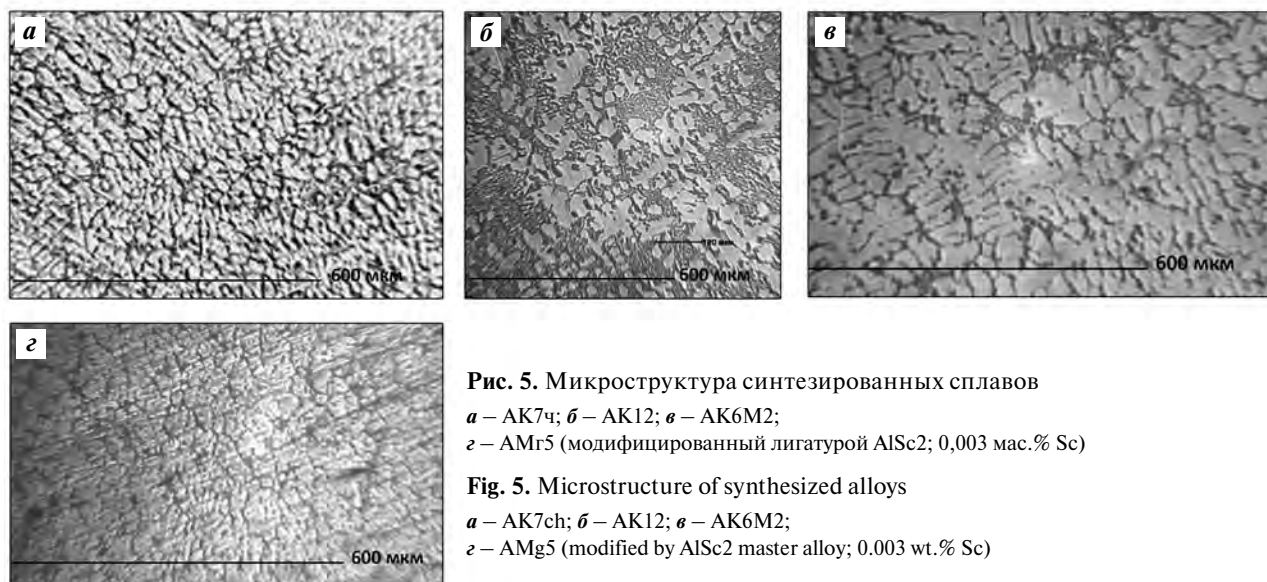


Рис. 5. Микроструктура синтезированных сплавов

а – АК7ч; **б** – АК12; **в** – АК6М2;
г – АМг5 (модифицированный лигатурой AlSc2; 0,003 мас.% Sc)

Fig. 5. Microstructure of synthesized alloys

а – АК7ч; **б** – АК12; **в** – АК6М2;
г – АМг5 (modified by AlSc2 master alloy; 0.003 wt.% Sc)

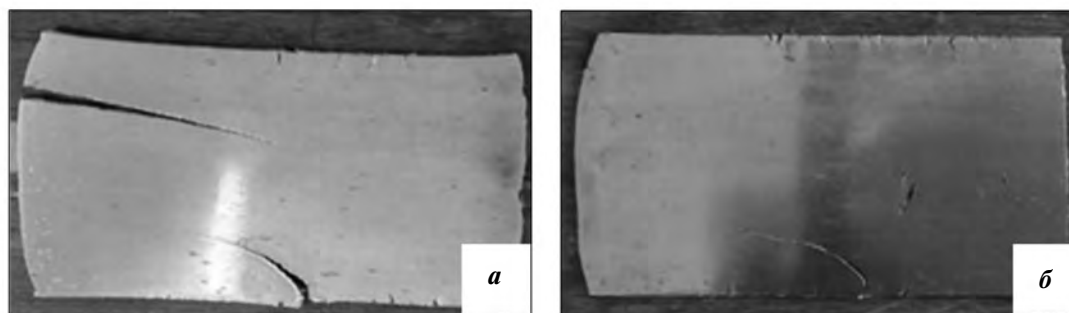


Рис. 6. Склонность к деформационной обработке синтезированного сплава АМг5

a — из немодифицированного сплава; *б* — из модифицированного сплава

Fig. 6. Tendency for deformation processing of the AMg5 synthesized alloy

a — from non-modified alloy; *b* — from modified alloy

Анализ полученных данных (см. рис. 5) показал, что в микроструктуре синтезированных сплавов отсутствуют газовая пористость и неметаллические включения.

Немодифицированные и модифицированные (0,003 мас.% Sc) 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. 6, *a*). Образец из модифицированного сплава выдержал 12 проходов (рис. 6, *б*). Степень деформации по толщине образца из немодифицированного сплава составила 60,5 %, для модифицированного — 67,2 %.

Заключение

Выполненные исследования показали, что синтезирование сплавов с учетом критериев качества рециклируемых 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 получение сплава с хорошей склонностью к деформационной обработке.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проектной части государственного задания № 0778-2020-0005.

Funding: *The research was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the project part of Government Task № 0778-2020-0005.*

Литература/References

1. Nappi C. The global aluminium industry 40 years from 1972. *World Aluminium*. 2013. http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2013/02/25/an_outlook_of_the_global_aluminium_industry_1972_-_present_day.pdf.
2. Dudin M.N., Voykova N.A., Frolova E.E., Artemieva J.A., Rusakova E.P., Abashidze A.H. Modern trends and challenges of development of global aluminum industry. *Metalurgija*. 2017. Vol. 56. P. 255—258.
3. Shaymaa Abbas Abdulsada. Preparation of aluminum alloy from recycling cans wastes. *Int. J. Current Eng. Technol.* 2013. Vol. 3. No. 4. P. 1348—1350.
4. Hatayama H., Daigo I., Matsuno Y., Adachi Y. Evolution of aluminum recycling initiated by the introduction of next-generation vehicles and scrap sorting technology. *Resour. Conserv. Recycl.* 2012. Vol. 66. P. 8—14.
5. Mustafa A. Rijab, Ali I. Al-Mosawi, Shaymaa A. Abdulsada, Raied K. Ajmi. Recycling of aluminum castings waste. *EC Chem.* 2015. Vol. 1. Iss. 2. P. 48—55.
6. Yongxiang Yang, Yanping Xiao, Bo Zhou, Markus A. Reuter. Aluminium recycling: scrap melting and process simulation. In: *Sustainable developments in metals processing*: Proc. John Floyd Int. Symp. (Melbourne, Australia, 3—6 July 2005). P. 251—263.
7. Praveenkumar C., Karuppuswamy P., Bhagyanathan C. Preliminary studies on melting of Lm25 grade alumi-

- um alloy for industrial applications. *Int. J. ChemTech Res.* 2017. Vol. 10. No. 14. P. 143–150.
8. Saravanakumar P., Bhoopashram J., Kavin Prasath M., Jaycharan M. Role of salt fluxes in aluminium refining: a review. *Int. J. Latest Eng. Manag. Res.* 2017. Vol. 2. Iss. 9. P. 45–51.
 9. Тимошкин И.Ю., Никитин К.В., Никитин В.И. Основные проблемы и направления в производстве качественных алюминиевых сплавов из рециклируемых металлических отходов. *Литейщик России*. 2010. No. 8. С. 24–26.
Timoshkin I.Yu., Nikitin K.V., Nikitin V.I. Main problems and directions in the production of high-quality aluminum alloys from recycled metal waste. *Liteishchik Rossii*. 2010. No. 8. P. 24–26 (In Russ.).
 10. Gaustad G., Olivetti E., Kirchain R. Improving aluminum recycling: A survey of sorting and impurity removal technologies. *Resour. Conserv. Recycl.* 2012. Vol. 58. P. 79–87.
 11. Marcos de Oliveira Moraes, Antonio Sérgio Brejão, Marcelo Araújo, Pedro Luiz de Oliveira Costa Neto. The reverse logistics helping to reduce costs of raw material in a pressure aluminum casting. *Environ. Quality Manag.* 2018. Vol. 28. Iss. 3. P. 40–46.
 12. Gronostajski J., Marciniak H., Matuszak A. New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling. *J. Mater. Process. Technol.* 2000. Vol. 106. Iss. 1-3. P. 34–39.
 13. Amini Mashhadi H., Moloodi A., Golestanipour M., Karimi E.Z.V. Recycling of aluminium alloy turning scrap via cold pressing and melting with salt flux. *J. Mater. Process. Technol.* 2009. Vol. 209. Iss. 7. P. 3138–3142.
 14. Velasco E., Nino J. Recycling of aluminium scrap for secondary Al–Si alloys. *Waste Manag. Res.* 2011. Vol. 29. Iss. 7. P. 686–693.
 15. Gökhan Özer, Sarp Burgucu, Müzeyyen Marşoğlu. A study on the recycling of aluminium alloy 7075 scrap. *Mater. Test.* 2012. Vol. 54. No. 3. P. 175–178.
 16. Løvik A.N., Müller D.B. A material flow model for impurity accumulation in beverage can recycling systems. *Light Metals*. 2014. P. 907–911.
 17. Adam J. Gesing, Subodh K. Das, Raouf O. Loutfy. Production of magnesium and aluminum-magnesium alloys from recycled secondary aluminum scrap melts. *J. Miner. Met. Mater. Soc.* 2016. Vol. 68. No. 2. P. 585–592.
 18. Yuksel C., Tamer O., Erzi E., Aybarc U., Cubuklusu E., Topcuoglu O., Cigdem M., Dispinar D. Quality evaluation of remelted A356 scraps. *Arch. Foundry Eng.* 2016. Vol. 16. Iss. 3. P. 151–156.
 19. Yusuf N.K., Lajis M.A., Ahmad A. Hot press as a sustainable direct recycling technique of aluminium: mechanical properties and surface integrity. *Materials*. 2017. Vol. 10. P. 1–18.
 20. Селянин И.Ф., Деев В.Б., Кухаренко А.В. Ресурсо- и экологосберегающие технологии производства вторичных алюминиевых сплавов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2015. No. 2. С. 20–25.
Selyanin I.F., Deev V.B., Kukharenko A.V. Resource-saving and environment-saving production technologies of secondary aluminum alloys. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. No. 3. P. 272–276.
 21. Никитин В.И., Никитин К.В. Наследственность в литых сплавах. М.: Машиностроение-1, 2005.
Nikitin V.I., Nikitin K.V. Heredity in cast alloys. Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2005 (In Russ.).
 22. Никитин К.В., Никитин В.И., Тимошкин И.Ю. Управление качеством литых изделий из алюминиевых сплавов на основе явления структурной наследственности. М.: Радуница, 2015.
Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu. Quality control of cast products from aluminium alloys based on the phenomenon of structural heredity. Moscow: Radunitsa, 2015 (In Russ.).
 23. Никитин К.В., Никитин В.И., Кривопалов Д.С., Глушченков В.А., Черников Д.Г. Влияние различных видов обработки на структуру, плотность и электропроводность деформируемых сплавов системы Al–Mg. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2017. No. 4. С. 46–52.
Nikitin K.V., Nikitin V.I., Krivopalov D.S., Glushchenkov V.A., Chernikov D.G. Influence of various treatment types on the structure, density, and electrical conductivity of Al–Mg system wrought alloys. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2017. Vol. 58. No. 5. P. 475–480.