



Научная статья

УДК 669.054.8

EDN: HXHRZM

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-648-656

К вопросу получения алюминиевых сплавов из вторичного металлizedированного сырья

А. Фернандес Пенья¹, В.Ю. Бажин^{2✉}, Д.В. Макушин³

¹⁻³Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Резюме. Цель – изучение особенностей получения высоколегированного сплава системы Al-Fe-Si-Mn из лома и металлizedированных отходов и определение факторов для оптимального технологического режима плавки и повышения выхода годной продукции при комплексной обработке расплава. В работе использованы различные методы анализов: рентгенофлуоресцентный, спектральный, рентгеноструктурный, дифференциальный термический. Проведен хроматографический и масс-спектрометрический анализ газов, выделяющихся при переплаве алюминиевых отходов, для определения безвозвратных потерь. Данные анализа свидетельствуют о том, что летучие соединения составляют 13–15% от общей массы потерь алюминия во время нагрева и плавления шихты. В результате проведенных тестовых плавов, выполненных с различными алюминиевыми отходами, установлено, что полученные отливки соответствуют некоторым маркам высоколегированных алюминиевых сплавов (например, 3xxx и 8xxx) и в основном относятся к системе Al-Fe-Si-Mn. Определены потери металла во время загрузки шихты в расплав с различной высотой слоя в печи, установлено по наилучшим результатам его рациональное значение, которое составляет 30–40% от массы загружаемой шихты. При внедрении комплексной технологии рафинирования и поэтапной обработки расплава получены образцы с выходом годного от 86 до 88%. Показано, что, согласно проведенному анализу химического состава, отливки содержат минимальное количество неметаллических включений (SiO₂, CaO, Al₂O₃, TiO₂) при допустимом содержании водорода (0,08–1,0 см³/100 г). Изучение структурных особенностей показало, что все образцы характеризуются сложной разветвленной структурой с наличием интерметаллических фаз типа AlFe(Si)Mn, которые имеют характерный вид, известный как «китайский шрифт», и достигают размеров от 70 до 120 мкм. Структура отливок в целом характеризуется однородностью и равномерным распределением агломератов из наноразмерных интерметаллидов в алюминиевой матрице, что дает возможность дальнейшего получения литых заготовок и прокатных изделий широкого спектра назначений.

Ключевые слова: вторичная металлургия, алюминиевые отходы, высоколегированный сплав, выход годной продукции, структура, интерметаллиды

Для цитирования: Фернандес Пенья А., Бажин В.Ю., Макушин Д.В. К вопросу получения высоколегированных алюминиевых сплавов из вторичного металлizedированного сырья // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 648–656. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-648-656>. EDN: HXHRZM.

METALLURGY

Original article

Valuable aluminum alloys obtained from secondary metallized raw materials

Alejandro Fernandez Penya¹, Vladimir Yu. Bazhin^{2✉}, Dmitry V. Makushin³

¹⁻³Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. In this work, we aim to obtain a high-alloy product of the Al-Fe-Si-Mn system from scrap and metallized waste, as well as to determine the optimal technological mode of melting for increasing the yield of finished products during complex processing of the melt. The study involved the following methods: X-ray fluorescence (XRF), spectral, X-ray structural, and differential-thermal analysis. Chromatographic and mass-spectrometric analysis of gases released during the remelting of aluminum waste was carried out to determine irrecoverable losses. Analysis data indicate that volatile compounds account for 13–15% of the total mass of aluminum lost during heating and melting of the charge. As a result of the test melts carried out with various aluminum wastes, the obtained castings were shown to correspond to some grades of high-alloy aluminum alloys (for example, 3xxx and 8xxx) mainly belong-

ing to the Al-Fe-Si-Mn system. The metal losses during loading of the charge into the melt at various layer heights in the furnace were determined. Its rational value was established based on the best results, representing 30–40% of the mass of the loaded charge. The implementation of a comprehensive technology for refining and step-by-step processing of the melt produced samples with a yield of 86 to 88%. According to the conducted analysis of the chemical composition, the castings contain a minimal quantity of non-metallic inclusions (SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , TiO_2) with an acceptable hydrogen content ($0.08\text{--}1.0\text{ cm}^3/100\text{ g}$). A study of the structural features characterized all samples as having a complex dendritic structure with the presence of intermetallic phases of the $\text{AlFe}(\text{Si})\text{Mn}$ type, which have a characteristic appearance known as "Chinese script" and reach sizes from 70 to 120 μm . The structure of the castings, which is generally characterized by its homogeneity and the uniform distribution of agglomerates of nanosized intermetallic compounds in the aluminum matrix, is suitable for obtaining cast blanks and rolled products for a wide range of purposes.

Keywords: secondary metallurgy, aluminum waste, superalloy, annual output, structure, intermetallic compounds

For citation: Fernandes Penya A., Bazhin V.Yu., Makushin D.V. Valuable aluminum alloys obtained from secondary metallized raw materials. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):648-656. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-648-656>. EDN: HXHRZM.

ВВЕДЕНИЕ

В современных промышленных условиях одним из важнейших приоритетов является достижение высокой энергоэффективности и минимизация материальных затрат при выпуске изделий с высокой добавленной стоимостью [1–4]. Рост потребности в переработке вторичных алюминиевых сплавов объясняется увеличением объема сбора и переработки отходов, включая металлическую упаковку и прочие изделия из алюминия⁴ [5]. В эту категорию отходов попадают не только банки для напитков [7], но и предметы обихода, такие как кухонные принадлежности, оконные профили и окрашенные детали автомобилей, что делает такие материалы пригодными для повторного использования в аналогичных продуктах [8, 9]. Однако переработка цветных металлов, особенно алюминия, значительно отстает от уровня переработки черных металлов. В ряде стран, например, на Кубе, ограниченные технические возможности не позволяют организовать переработку металлолома на местном уровне, и большая часть металлического сырья отправляется на переплавку в другие страны, что повышает затраты на логистику и снижает эффективность процесса. Основная проблема заключается в значительном уровне загрязнения лома цветных металлов, в том числе красками, лаками и защитными покрытиями, требующими дополнительной очистки и подготовки [10, 11].

Для качественной переработки алюминиевого лома с лакокрасочными покрытиями

требуются усовершенствованные технологии рафинирования и специализированные плавильные установки [12]. На сегодняшний день многие предприятия, перерабатывающие металлосодержащую продукцию, используют отражательные печи для переплавки отходов [13]. Однако этот метод не учитывает экологические и экономические аспекты переработки окрашенного лома, что влияет на рентабельность и качество продукции. Кроме того, в отражательных печах, в отличие от более современных роторных агрегатов⁵ [14–16], практически невозможно эффективно регулировать атмосферу внутри печи, что снижает контроль над процессом и ухудшает качество конечного продукта [17].

Высокая эффективность отражательных печей достигается только при загрузке брикетированного лома непосредственно в расплав, известный как слой «болото» [18]. Это условие ограничивает возможности получения сплавов из шихты с лакокрасочными покрытиями, поскольку часть красок улетучивается при загрузке и нагреве шихты, а другая может вызывать термические реакции в расплаве алюминия, особенно на его поверхности. Даже многоступенчатое рафинирование и дегазация расплава не могут полностью предотвратить образование неметаллических и оксидных включений, что отрицательно сказывается на качестве получаемых алюминиевых отливок [19].

Когда перерабатываемый лом содержит значительные примеси в виде красок и дру-

⁴Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я. Экология и утилизация отходов при производстве алюминия: учеб. пособ. 2-е изд. М.: Флинта, 2005. 268 с. EDN: QMZQIR.

⁵Новичков С.Б. Теория и практика переработки отходов алюминия в наклонных печах: дис. д-ра техн. наук: 05.16.02. Иркутск, 2008. 333 с. EDN: NJEPML.

гих органических соединений, необходимо создать условия для удаления этих покрытий и избежать потерь металла вследствие сгорания органики⁶ [20, 21]. Оптимизация процесса плавки требует обеспечения в печи избытка воздуха для полного выгорания органических компонентов, особенно на начальной стадии постепенного нагрева шихты, которые, в свою очередь, могут резко воспламениться при загрузке в горячую зону горелки [22]. Наиболее подходящими установками для переработки алюминиевого лома являются роторные барабанные печи наклонного типа (РНП), способные поддерживать контролируемую атмосферу, что способствует повышению качества и снижению технологических потерь на всех стадиях плавки² [23]. Кроме того, такие печи позволяют автоматизировать управление процессом, обеспечивая надежный контроль температурного режима при снижении доли вредных выбросов, что отвечает современным экологическим требованиям.

Настоящее исследование нацелено на создание литых заготовок из алюминиевого сплава заданного состава, получаемых путем вторичной переработки алюминиевой упаковки и банок для напитков. Экспериментальные результаты подтверждают преимущества перехода от отражательных печей к РНП для переработки вторичного алюминийсодержащего сырья с лакокрасочными покрытиями, что открывает перспективы для повышения энергоэффективности, улучшения качества продукции и снижения негативного воздействия на окружающую среду. В данной работе были интерпретированы ранее полученные результаты в свете современных представлений по переработке лома цветных металлов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектроскопическое исследование образцов после плавки. В ходе работы было проведено три плавки алюминиевого лома (мелкого скрапа), покрытого красками и

лаками, с использованием в шихте очищенных, минимально загрязненных органическими соединениями образцов. Загруженная шихта размещалась в графитовом тигле и направлялась в трехсекционный плавильный агрегат, включающий плавильную печь, миксер и литейное устройство. Экспериментальные лабораторные плавки позволили определить влияние предварительной термической обработки на выход годного продукта – алюминиевого сплава. После плавления и литья образцов № 1–3 в формы отбирались аншлифы для спектрометрического анализа. Автоматизированный рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-6000 (Япония) использовался для определения фазового состава, что позволило выявить содержание примесей и определить качественный состав отливок. Спектральный анализ подтвердил наличие более 20 элементов, присутствующих в различных соотношениях в виде соединений с основными компонентами. Полученные отливки соответствуют стандартам по EN AW для некоторых марок высоколегированных алюминиевых сплавов (например, 3XXX и 8XXX) и в основном относятся к системе Al-Fe-Si-Mn. Содержание Mn в отливках изменялось в интервале от 0,9 до 1,5 масс. %.

Хроматографический и масс-спектрометрический анализ газов, выделяющихся при переплавке алюминиевого лома. Важным этапом анализа стало исследование выделяющихся при плавке газов. Пробы загрязненного органическими соединениями алюминиевого лома массой 15 г подвергались нагреву до 250 и 490 °С для оценки состава газов, образующихся в результате термического разложения органических покрытий и иных загрязнений. Подготовленный алюминиевый лом (скрап) не подвергался брикетированию или прессованию, что позволило воссоздать реальные условия выделения газообразных выбросов, начиная с этапа сушки до плавления. Мелкоизмельченный алюминий размещался в стеклянной ка-

Таблица 1. Интервалы содержания элементов в отливках, масс. %

Table 1. Element percentage content in castings, wt%

| Al | Mn | Fe | Si | Cu | Zn | Примеси |
|-----------|---------|--------|--------|---------|--------|---------|
| 96,7–97,1 | 1,1–1,5 | до 0,6 | до 0,5 | 0,1–0,3 | до 0,1 | 0,14 |

⁶Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я. Металлургия вторичного алюминия: учеб. пособ. М.: Наука, 1998. 112 с.

пиллярной трубке, расположенной в горизонтальном положении в печи. Для регистрации выделяющихся летучих соединений в течение 20 мин через трубку пропускаться поток гелия объемом 1,5 л. Выделенные соединения осаждались в трубке, содержащей многослойный угольный фильтр. Десорбция проводилась в специальном устройстве Tekmar 6000, сопряженном с масс-спектрометром Pfeiffer Vacuum Termostar GSD301T3 (Германия). Зарегистрированные масс-спектры летучих соединений в период нагрева шихты и проведенный анализ состава выделенных летучих соединений показали, что в большинстве это CO , CO_2 , ZnO , а также пары HCl , P_2O_5 . Поскольку лак и краски представляют собой растворы смол (натуральных или синтетических) в различных растворителях (углеводороды, кетоны (ацетон, метилэтилкетон, ацетаты и др.)), то именно эта группа соединений выделяется из шихты в первый период времени при температуре 350–400 °С.

Данные термогравиметрического анализа показали, что максимальная интенсивность выделения летучих соединений из органики наблюдалась при температуре 150–320 °С (рис. 1). Эти данные приводились в ранних исследованиях авторов [24], но были уточнены в этой работе.

Из полученных данных термогравиметрического анализа видно, что показатель убыли массы после 320 °С резко снижается (почти в два раза), что связано с удалением

влаги на стадии нагрева, и при и газообразных продуктов при сгорании лакокрасочного покрытия. Результаты термогравиметрического и масс-спектрометрического анализов свидетельствуют о том, что летучие соединения составляют 13–15% от общей массы потерь алюминия.

Расчет высоты слоя металла и выход годного металла. Алюминиевые отливки из алюминиевого скрапа, полученные в ходе экспериментов, подвергались химическому и металлографическому анализам. На подготовительном этапе шихтовые материалы, представлявшие собой 1,5 кг алюминиевых отходов (в виде измельченных упаковок для напитков), тщательно перемешивались и взвешивались для каждой плавки (образцы № 1–3). Для точного контроля массы использовались аналитические весы с диапазоном измерений от 5 до 1000 г и погрешностью в 0,1 г. Плавка проводилась в интервале температур 750–780 °С; в процессе добавлялся флюс ($\text{NaCl} + \text{NaAlF}_4$) в количестве 20 г для рафинирования расплава. Затем расплав тщательно перемешивался для отбора проб с поверхности химического анализа. Полученный сплав заливался в круглые формы, и после охлаждения отливки взвешивались для расчета выхода годного (ВГ) металла согласно формуле (1):

$$ВГ = \frac{M(\text{отливки})}{M(\text{навески})} \cdot 100\%. \quad (1)$$

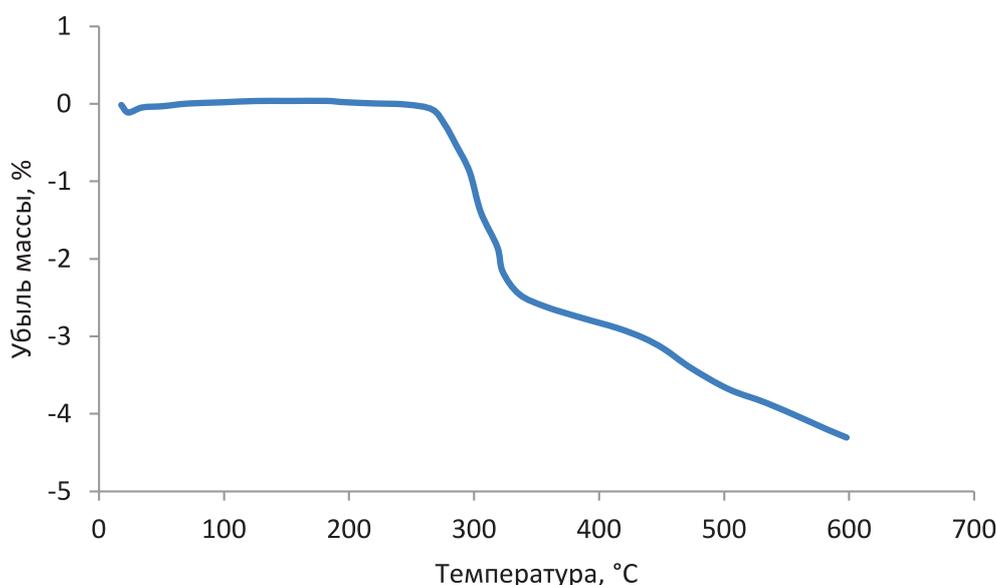


Рис. 1. Данные термогравиметрического анализа при нагреве шихты из алюминиевого скрапа

Fig. 1. Thermogravimetric analysis data during heating of aluminum scrap charge

Таблица 2. Показатели эксперимента по изучению влияния высоты слоя металла на выход годного металла
Table 2. Experimental results of studying the effect of metal layer height on yields

| М(слой Al), г | М(навеска), г | М(шлак), г | М(остаток), г | М(литье), г | Выход, % |
|---------------|---------------|------------|---------------|-------------|----------|
| 0 | 100 | 17,9 | 4,3 | 76,7 | 75,7 |
| 76,7 | 100 | 22,3 | 4,2 | 150,1 | 83,9 |
| 159,1 | 100 | 25,1 | 7,2 | 217,7 | 86,0 |
| 285,5 | 100 | 36,9 | 4,8 | 345,1 | 89,2 |
| 348,2 | 100 | 30,7 | 5,2 | 409,0 | 92,9 |

В результате проведенных плавов ВГ металла составил 75,5% для отливки № 1, 79,2% для отливки № 2 и 80,1% для отливки № 3. Для повышения выхода металла при промышленной переработке алюминиевой упаковки целесообразно применять предварительные операции дробления и отжига с последующим прессованием лома в «брикеты» [25, 26]. В дополнение к прессованию: значительное увеличение выхода обеспечивается загрузкой лома непосредственно в расплавленный слой металла, так называемое «болото», что способствует его равномерному нагреву и плавлению [27].

На основе данных предыдущих плавов в аналогичных условиях проведены дополнительные эксперименты, направленные на оценку влияния высоты слоя металла (незавершенное производство) на ВГ. В ходе каждого опыта отбирались образцы массой 100 г алюминиевого сплава, при этом высота слоя расплава в тигле изменялась для точной оценки влияния этого параметра на итоговые значения исследуемого показателя.

Результаты показали, что увеличение высоты металлического слоя способствует повышению ВГ металла за счет улучшения теплопередачи и сокращения потерь на образование оксидных включений (табл. 2 и рис. 2). Эти данные также были уточнены после серии проведенных дополнительных опытов.

Определены потери металла во время загрузки шихты в расплав с различной высотой слоя в печи, и установлено (по наилучшим показателям) его рациональное значение, которое составляет 30–40% от массы загружаемой шихты. Расчетные значения имеют сходимость с уточненными экспериментальными результатами (рис. 3).

Для практического применения рекомендуется осуществлять плавку мелкозагрязненного лома и алюминиевой стружки в РНП с возможностью контроля атмосферы и поддержания определенной высоты слоя расплава. При правильном выборе температурного режима, включающем оптимальные скорости нагрева и плавления, исполь-

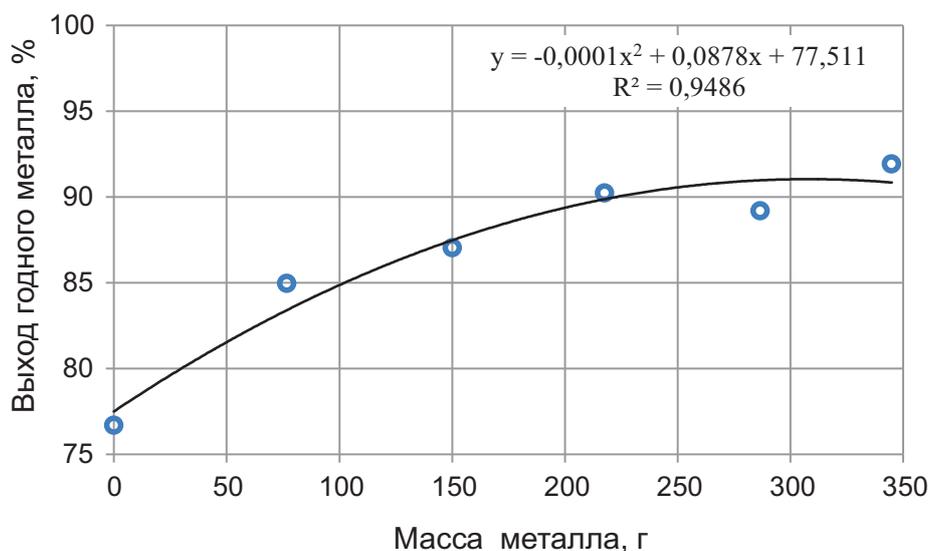


Рис. 2. Влияние высоты слоя металла на выход годного продукта
Fig. 2. Metal layer height vs metal yield

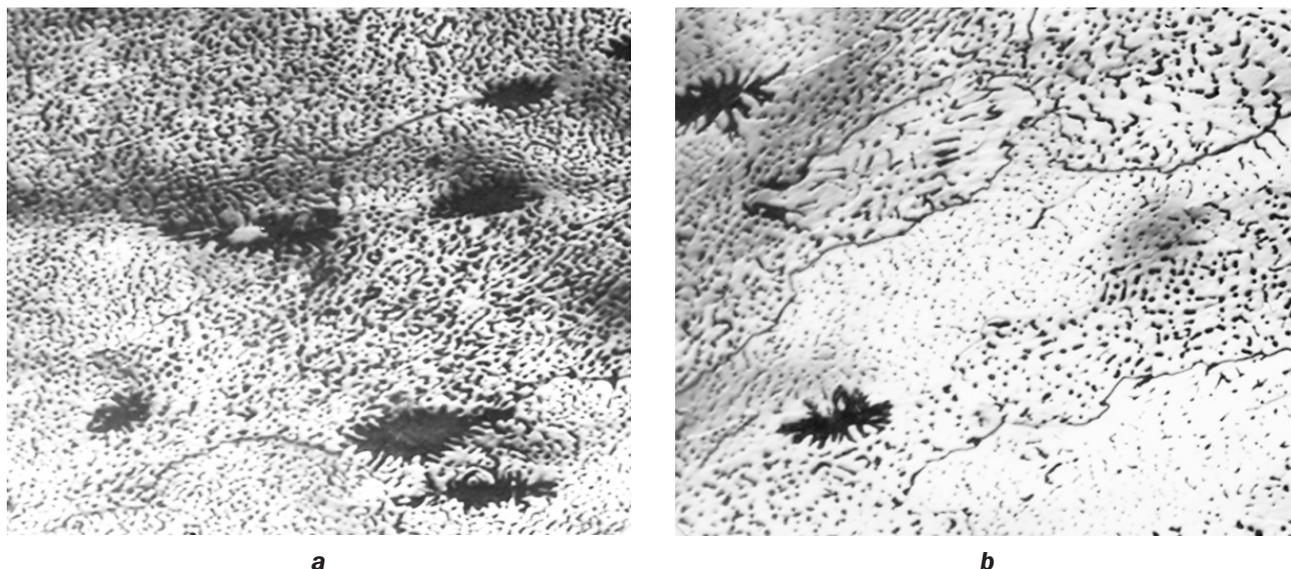


Рис. 3. Микроструктура литого образца алюминиевого сплава: а – при содержании железа 0,65%; б – при содержании железа 0,85%

Fig. 3. Microstructure of an aluminum alloy cast sample: a – 0.65% iron content; b – 0.85% iron content

зование данного типа печей обеспечивает повышение выхода готового металла. Такие условия создают более эффективное распределение тепла и минимизируют потери, связанные с окислением, что делает технологию предпочтительной для переработки загрязненного алюминиевого вторичного сырья.

Металлографическое исследование литых образцов. Как известно, наличие различных включений в алюминии и его сплавах может ухудшать их свойства [28, 29]. В связи с этим необходимо изучить микроструктуру экспериментальных образцов. Для анализа микроструктуры отливки из каждой партии были подготовлены путем разлива расплава в круглые огнеупорные формы, с последующей резкой вдоль осевой линии. После этого образцы подвергались полировке и травлению в 12%-м растворе ортофосфорной кислоты на протяжении восьми минут, что позволило более четко визуализировать структурные особенности отливки. Исследование структуры образцов проводилось методом растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа с использованием микроскопа JSM-6460 LV (JEOL, Япония) в сочетании с аналитическим модулем с приставкой INCA (Великобритания), что обеспечило высокую точность в выявлении структурных и фазовых особенностей. На рис. 3 представлена типичная микрострукту-

ра отливок при различном содержании железа в алюминиевом сплаве.

На рис. 3 видны значительные различия в микроструктуре образцов при различном содержании железа. С повышением Fe и количества интерметаллических фаз с первичной игольчатой структурой (темного цвета) локально изменяется структура самой алюминиевой матрицы. При этом, в некоторых местах наблюдается смещение и дробление эвтектических включений Al-Si (рис. 3 б), что определяется наличием и влиянием уже очагов крупных устойчивых игольчатых интерметаллических фаз типа Al_3Fe и мелких метастабильных фаз $FeSiAl_5$ с размерами 50–70 нм.

Все образцы характеризуются сложной разветвленной структурой интерметаллических фаз типа $AlFe(Si)Mn$, которые имеют характерный вид, известный как «китайский шрифт», и достигают размеров от 70 до 120 мкм. Частично наблюдаются локальные очаги дендритной структуры, что связано с процессом кристаллизации, происходившим в условиях жидко-твердого состояния в кристаллизаторе. Наличие дендритов может повышать прочность сплава, однако их структура также способствует формированию междендритной пористости, которая в сочетании с оксидными пленками различной конфигурации может снижать механические свойства отливки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показали, что при термической обработке алюминиевого лома, покрытого краской и лаком, в температурном диапазоне 250–450 °С с его поверхности выделяется значительное количество летучих соединений, представляющих собой продукты разложения органических покрытий. Быстрый нагрев шихты приводит к самовоспламенению (горению) лакокрасочных покрытий, что, возможно, связано с очаговыми термическими реакциями. Результаты термогравиметрического и масс-спектрометрического анализов свидетельствуют о том, что летучие соединения составляют 13–15% от общей массы потерь алюминия, что обуславливает необходимость улучшения технологических условий плавания.

Анализ химического состава показал, что состав отливок из переработанного лома близок по параметрам к сплавам марок 3xxx и 8xxx, с содержанием марганца в пределах 1,1–1,5% и алюминия на уровне 96,3–97,9%. Эти характеристики позволяют использовать отливки в широком спектре литья, при этом ВГ металла составил от 75,5 до 80,1%, что подтверждается данными по отдельным отливкам.

Микроструктурное исследование образцов выявило наличие крупных иглообразных интерметаллических фаз, которые снижают пластичность и могут способствовать об-

разованию пористости при недостаточной очистке расплава. В частности, фазы устойчивого типа Al_3Fe и метастабильного типа $FeSiAl_5$, обнаруженные в структуре, указывают на необходимость более тщательной подготовки шихты и контроля микроструктуры при переработке лома с красками и лаками. Учитывая выявленные особенности, рекомендуется перед плавлением подвергать шихту предварительному отжигу для удаления органических примесей и обеспечения более равномерного нагрева алюминиевой шихты.

Для увеличения выхода годного металла и улучшения качества отливок важно применять плавку в условиях регулируемой атмосферы в РНП, где возможно поддержание постоянной температуры и удаление оксидов с поверхности расплава. Поддержание заданной атмосферы предотвращает окисление алюминия и способствует более стабильному процессу плавки. Согласно проведенным научным исследованиям, последовательное рафинирование и дегазация существенно снижают количество включений и улучшают качество сплава. Дополнительно рекомендуется установка пеночероамических фильтров для фильтрации расплава, что позволит удалять мельчайшие оксидные и неметаллические включения, повышая чистоту и механические свойства конечных отливок [30].

Список источников

1. Litvinenko V.S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector // *Natural Resources Research*. 2020. Vol. 29. № 3. P. 1521–1541. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09568-4>. EDN: WGABFS.
2. Гусева Е.Н. Использование вторичных минеральных ресурсов цветной металлургии – важный резерв ресурсосбережения // *Записки Горного института*. 2003. Т. 155. С. 194–197.
3. Ларичкин Ф.Д. Минерально-сырьевые ресурсы в экономике России // *Записки Горного института*. 2008. Т. 179. С. 9–13. EDN: LHPXML.
4. Горланов Е.С., Леонтьев Л.И. Направления технологического развития алюминиевых электролизеров // *Записки Горного института*. 2024. Т. 266. С. 246–259. EDN: PYSEVM.
5. Ünlü N., Drouet M.G. Comparison of salt-free aluminum dross treatment processes // *Resources, Conservation and Recycling*. 2002. Vol. 36. Iss. 1. P. 61–72. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00010-1).
6. Raabe D. The materials science behind sustainable metals and alloys // *Chemical reviews*. 2023. Vol. 123. Iss. 5. P. 2436–2608. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00799>.
7. Lavoie S., Dube G. A salt-free treatment of aluminium dross using plasma heating // *JOM*. 1991. P. 54–55. <https://doi.org/10.1007/BF03220144>.
8. Макаров Г.С. Мировые тенденции в области переработки и применения вторичного алюминия // *Технология легких сплавов*. 2004. № 1. С. 25–30.
9. Meshram A., Singh K.K. Recovery of valuable products from hazardous aluminum dross: a review // *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 130. P. 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.026>.
10. Gaustad G., Olivetti E., Kirchain R. Improving aluminum recycling: a survey of sorting and impurity removal technologies // *Resources, Conservation and Recycling*. 2012. Vol. 58. P. 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.010>.

11. Domagala J., Haag P., Niehoff T., Schmitz C. Handbook of aluminium recycling: mechanical preparation, metallurgical processing, heat treatment / eds. C. Schmitz. Essen: Vulkan-Verlag, 2014. 536 p.
12. Capuzzi S., Timelli G. Preparation and melting of scrap in aluminum recycling: a review // *Metals*. 2018. Vol. 8. Iss. 4. P. 249. <https://doi.org/10.3390/met8040249>.
13. Пат. № 2529348, Российская Федерация, С22В 7/00, F27В 3/00. Отражательная печь для переплава алюминиевого лома / В.А. Трусов; заявитель и патентообладатель В.А. Трусов. Заявл. 17.05.2013; опубл. 27.09.2014.
14. Rovin S.L., Kalinichenko A.S., Rovinc L.E. Recycling of dispersed metal wastes in rotary furnaces // *Journal of Casting & Materials Engineering*. 2019. Vol. 3. No. 2. P. 43–49. <http://doi.org/10.7494/jcme.2019.3.2.43>.
15. Ровин С.Л. Перспективы применения ротационных печей. Рециклинг металлоотходов // *Литейное производство и металлургия: сб. тр. XXV Междунар. науч.-техн. конф. (г. Минск, 18–19 октября 2017 г.)*. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2017. P. 65–71.
16. Drouet M.G., Meunier J., Laflamme C.B., Handfield M.D., Biscaro A., Lemire C. A rotary arc furnace for aluminium dross processing // *Third International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials (Alabama, 12–15 November 1995)*. Alabama: The Mineral, Metals and Materials Society, 1995. P. 803–812.
17. Kos B. Direct dross treatment by centrifuging of hot dross // *Aluminium*. 2000. Vol. 76. P. 35–36.
18. Wibner S., Antrekowitsch H., Meisel T.C. Studies on the formation and processing of aluminium dross with particular focus on special metals // *Metals*. 2021. Vol. 11. Iss. 7. P. 1108. <https://doi.org/10.3390/met11071108>.
19. Wallace G. 4 - Production of secondary aluminium // *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*. 2011. P. 70–82. <https://doi.org/10.1533/9780857090256.1.70>.
20. Raabe D., Ponge D., Uggowitzer P.J., Roscher M., Paolantonio M., Liu Chuanlai, et al. Making sustainable aluminum by recycling scrap: the science of “dirty” alloys // *Progress in Materials Science*. 2022. Vol. 128. P. 100947. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100947>.
21. Drouet M.G., Leroy R.L., Tsantrizos P.G. Drosrite salt-free processing of hot aluminium dross // *TMS Fall Extraction and Process, Metallurgy Meeting (Pittsburgh, Pennsylvania, 22–25 October 2000)*. Pittsburgh, Pennsylvania: The Minerals, Metals and Materials Society, 2000. P. 1135–1145.
22. Kolbeinsen L. The beginning and the end of the aluminium value chain // *Matériaux & Techniques*. 2020. Vol. 108. Iss. 5-6. P. 506. <https://doi.org/10.1051/mattech/2021008>.
23. Новичков С.Б. Закономерности плавки алюминиевого шлака в роторной наклонной печи // *Цветные металлы*. 2004. № 1. С. 67–70.
24. Ибрагимов В.Э., Гарсия Л.М., Бажин В.Ю. Плавка тонкостенного лома с лакокрасочными покрытиями для получения алюминиевого сплава // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. № 2. С. 14–17. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.44.068>.
25. Shinzato M.C., Hypolito R. Solid waste from aluminum recycling process: characterization and reuse of its economically valuable constituents // *Waste management*. 2005. Vol. 25. Iss. 1. P. 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.08.005>.
26. Wong David S., Lavoie P. Aluminum: recycling and environmental footprint // *JOM*. 2019. Vol. 71. № 9. P. 2926–2927. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03656-9>.
27. Жолнин А.Г., Новичков С.Б. Механизм перехода алюминия из шлака в «болото» при плавке алюминиевых отходов в роторных печах // *Цветная металлургия*. 2003. № 1. С. 22–27.
28. Nemchinova N.V., Belskii S.S., Vlasov A.A. Studying aluminum alloy defects // *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 316. P. 353–358. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.353>.
29. Немчинова Н.В., Тютрин А.А. Металлографическое исследование образцов алюминиевых рондолой // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 3. С. 124–128. EDN: TNIQRV.
30. Фомин Б.А., Москвитин В.И., Махов С.В. Металлургия вторичного алюминия: монография. М.: ЭКОМЕТ, 2004. 238 с. EDN: QMZMIB.

References

1. Litvinenko V.S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*. 2020;29(3):1521-1541. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09568-4>. EDN: WGABFS.
2. Guseva E.N. Using secondary mineral resources of non-ferrous metallurgy is an important reserve for resource conservation. *Journal of Mining Institute*. 2003;155:194-197. (In Russ.).
3. Larichkin F.D. Mineral resources in the Russian economy. *Journal of Mining Institute*. 2008;179:9-13. (In Russ.). EDN: LHPXML.
4. Gorlanov E.S., Leont'ev L.I. Directions in the technological development of aluminium pots. *Journal of Mining Institute*. 2024;266:246-259. (In Russ.). EDN: PYSEVM.
5. Ünlü N., Drouet M.G. Comparison of salt-free aluminum dross treatment processes. *Resources, Conservation and Recycling*. 2002;36(1):61-72. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00010-1).
6. Raabe D. The materials science behind sustainable metals and alloys. *Chemical reviews*. 2023;123(5):2436-2608. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00799>.
7. Lavoie S., Dube G. A salt-free treatment of aluminium dross using plasma heating. *JOM*. 1991;54-55. <https://doi.org/10.1007/BF03220144>.

8. Makarov G.S. Global trends in secondary aluminum recycling and use. *Light alloy technology*. 2004;1:25-30. (In Russ.).
9. Meshram A., Singh K.K. Recovery of valuable products from hazardous aluminum dross: a review // *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 130. P. 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.026>.
10. Gaustad G., Olivetti E., Kirchain R. Improving aluminum recycling: a survey of sorting and impurity removal technologies // *Resources, Conservation and Recycling*. 2012. Vol. 58. P. 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.010>.
11. Domagala J., Haag P., Niehoff T., Schmitz C. *Handbook of aluminium recycling: mechanical preparation, metallurgical processing, heat treatment*. Essen: Vulkan-Verlag; 2014, 536 p.
12. Capuzzi S., Timelli G. Preparation and melting of scrap in aluminum recycling: a review. *Metals*. 2018;8(4):249. <https://doi.org/10.3390/met8040249>.
13. Trusov V.A. *Reverberatory furnace for aluminium scrap remelting*. Patent RF, no. 2529348; 2014. (In Russ.).
14. Rovin S.L., Kalinichenko A.S., Rovinc L.E. Recycling of dispersed metal wastes in rotary furnaces. *Journal of Casting & Materials Engineering*. 2019;3(2):43-49. <http://doi.org/10.7494/jcme.2019.3.2.43>.
15. Rovin S.L. Outlooks for application of rotary furnaces. Metal waste recycling. In: *Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya: sbornik trudov XXV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Foundry Production and Metallurgy: Collected Proceedings of the 25th International Scientific and Technical Conference*. 18–19 October, Minsk. Minsk: Belorusskij nacional'nyj tehnicheskij universitet; 2017, p. 65-71. (In Russ.).
16. Drouet M.G., Meunier J., Laflamme C.B., Handfield M.D., Biscaro A., Lemire C. A rotary arc furnace for aluminium dross processing. In: *Third International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials*. 12–15 November 1995, Alabama. Alabama: The Mineral, Metals and Materials Society; 1995, p. 803-812.
17. Kos B. Direct dross treatment by centrifuging of hot dross. *Aluminium*. 2000;76:35-36.
18. Wibner S., Antrekowitsch H., Meisel T.C. Studies on the formation and processing of aluminium dross with particular focus on special metals. *Metals*. 2021;11(7):1108. <https://doi.org/10.3390/met11071108>.
19. Wallace G. 4 - Production of secondary aluminium. *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*. 2011;70-82. <https://doi.org/10.1533/9780857090256.1.70>.
20. Raabe D., Ponge D., Uggowitzer P.J., Roscher M., Paolantonio M., Liu Chuanlai, et al. Making sustainable aluminum by recycling scrap: the science of “dirty” alloys. *Progress in Materials Science*. 2022;128:100947. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100947>.
21. Drouet M.G., Leroy R.L., Tsantrizos P.G. Drossite salt-free processing of hot aluminium dross. In: *TMS Fall Extraction and Process, Metallurgy Meeting*. 22–25 October 2000, Pittsburgh, Pennsylvania. Pittsburgh, Pennsylvania: The Minerals, Metals and Materials Society; 2000, p. 1135-1145.
22. Kolbeinsen L. The beginning and the end of the aluminium value chain. *Matériaux & Techniques*. 2020;108(5-6):506. <https://doi.org/10.1051/mattech/2021008>.
23. Novichkov S.B. Regularities of aluminum slag smelting in a rotary tilting furnace. *Tsvetnye metally*. 2004;1:67-70. (In Russ.).
24. Ibragimov V.E., Garcia M.L., Bazhin V.Y. Melting of thin walled paint scrap coatings for aluminum alloy production. *International Research Journal*. 2016;2:14-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.44.068>.
25. Shinzato M.C., Hypolito R. Solid waste from aluminum recycling process: characterization and reuse of its economically valuable constituents. *Waste management*. 2005;25(1):37-46. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.08.005>.
26. Wong David S., Lavoie P. Aluminum: recycling and environmental footprint. *JOM*. 2019;71(9):2926-2927. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03656-9>.
27. Zholnin A.G., Novichkov S.B. Mechanism of aluminum transition from slag to melt during smelting of aluminum waste in rotary furnaces. *Nonferrous metallurgy*. 2003;1:22-27. (In Russ.).
28. Nemchinova N.V., Belskii S.S., Vlasov A.A. Studying aluminum alloy defects. *Solid State Phenomena*. 2021;316:353-358. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.353>.
29. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A. Metallographic investigation of aluminum rondol samples. *Fundamental research*. 2015;3:124-128. (In Russ.). EDN: TNIQRV.
30. Fomin B.A., Moskvitin V.I., Mahov S.V. *Metallurgy of secondary aluminum*. Moscow: EKOMET; 2004, 238 p. (In Russ.). EDN: QMZMIB.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фернандес Пенья Александро,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург,
Васильевский остров, 21 линия, 2, Россия
s243022@stud.spmi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alejandro Fernandes Penya,
Postgraduate Student,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining
University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia
s243022@stud.spmi.ru

Бажин Владимир Юрьевич,

д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург,
Васильевский остров, 21 линия, 2, Россия
✉ bazhin-alfoil@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

Vladimir Yu. Bazhin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Metallurgy Department,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining
University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia
✉ bazhin-alfoil@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

Макушин Дмитрий Владимирович,

к.т.н.,
доцент кафедры металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург,
Васильевский остров, 21 линия, 2, Россия
dimanych99@mail.ru

Dmitry V. Makushin,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Metallurgy Department,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining
University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia
dimanych99@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 31.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 20.11.2024 г.; принята к публикации 09.12.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 31.10.2024; approved after reviewing 20.11.2024; accepted for publication 09.12.2024.