



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-4-42-49>  
УДК 669.046

Поступила 15.09.2021  
Received 15.09.2021

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ ШЛАКОВ И ПРОДУКТОВ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Л. В. ТРИБУШЕВСКИЙ, Б. М. НЕМЕНЕНОК, Г. А. РУМЯНЦЕВА, А. В. АРАБЕЙ,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.  
E-mail: nemenenok@bntu.by

*В работе приведены результаты анализа технической литературы и собственных исследований по использованию алюминиевых шлаков и продуктов их переработки в металлургическом производстве. Показано, что основная масса реагентов, полученных из отходов производства вторичного алюминия (ОПВА), используется с повышенным содержанием хлористых солей натрия и калия. Это создает определенные неудобства при внепечной обработке стали из-за повышенного содержания хлоридов в рабочей зоне. Предлагается для обработки стали использовать ОПВА, образующиеся при бесфлюсовой плавке или отвалы алюминиевые шлаки. Это позволяет снизить содержание остатков солевых флюсов до 1,0–1,5% и улучшить условия труда на установках «печь-ковш» при разжижении рафинировочных шлаков.*

**Ключевые слова.** Алюминиевый шлак, раскисление, десульфурация, разжижение шлака, экология, неметаллические включения.

**Для цитирования.** Трибушевский, Л. В. Применение алюминиевых шлаков и продуктов их переработки в металлургическом производстве / Л. В. Трибушевский, Б. М. Немененок, Г. А. Румянцова, А. В. Арабей // *Литье и металлургия*. 2021. №4. С. 42–49. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-4-42-49>.

## USING OF ALUMINIUM SLAGS AND PRODUCTS OF THEIR PROCESSING IN METALLURGICAL PRODUCTION

L. V. TRIBUSHEVSKIY, B. M. NEMENENOK, G. A. RUMIANTSEVA, A. V. ARABEY,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty ave. E-mail: nemenenok@bntu.by

*The work contains the results of the analysis of technical literature and author's research on the use of aluminium slags and products of their processing in metallurgical production. It has been shown that the bulk of reagents derived from secondary aluminum production wastes (APWs) are used with increased sodium and potassium chloride. This creates some inconvenience for out-of-furnace steel treatment due to the increased chloride content in the working area. It is proposed for steel processing to use APWs formed during flux-free melting or dump aluminium slags. This allows to reduce the content of salt fluxes residues to 1.0–1.5% and to improve working conditions at ladle furnaces when liquefying refining slags.*

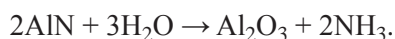
**Keywords.** Aluminium slag, acidification, desulphurization, slag dilution, ecology, non-metallic inclusions.

**For citation.** Tribushevskiy L. V., Nemenenok B. M., Rumiantseva G. A., Arabey A. V. Using of aluminium slags and products of their pro-cessing in metallurgical production. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 4, pp. 42–49. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-4-42-49>.

В современных условиях рециклинг алюминия обеспечивает существенную экономию энергии и невозобновляемых сырьевых ресурсов, а также сокращение выбросов «парниковых» газов, уменьшая тем самым так называемый «углеродный след» от производства алюминия [1].

Плавка лома и отходов алюминия под слоем флюса в настоящее время является одним из наиболее распространенных методов получения алюминиевых сплавов из вторичного сырья. Побочным продуктом такой плавки являются солевые шлаки, в которых содержатся алюминий и другие ценные металлы [2]. Содержание алюминия в таких шлаках составляет от 6,0 до 15% при плавке алюминиевого лома и отходов в отражательных печах с использованием 10–20% флюсов от массы шихты. Кроме металлического алюминия, такие шлаки содержат  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{SiO}_2$ ;  $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{AlN}$ ;  $\text{Al}_4\text{C}_3$ ;  $\text{NaCl}$ ;  $\text{KCl}$ ;  $\text{MgCl}_2$ . При остаточном содержании алюминия в шлаке менее 10% его дальнейшая переработка считается нерентабельной и такой шлак складывается в отвалах, которые занимают сотни

гектаров плодородных земель, выводя эти площади из сельскохозяйственного оборота. Под воздействием атмосферных условий шлаки интенсивно разлагаются, выделяя аммиак, сероводород, ацетилен, пропан и другие токсичные газы [3, 4]:



Соли, содержащиеся в шлаках, растворяясь, загрязняют и засоляют почву, поверхностные и подземные воды. Наибольшую опасность представляют мелкодисперсные пылевидные частицы, которые легко поднимаются ветром и переносятся на значительные расстояния, загрязняя атмосферу, почву, водоемы, что наносит экологический вред окружающей среде и экономический ущерб народному хозяйству [5, 6]. Для предприятий Российской Федерации ежегодный выход таких отходов составляет 300–400 тыс. т [6]. Значительные объемы отвальных алюминиевых шлаков скопились и на предприятиях Республики Беларусь (рис. 1).



Рис. 1. Отходы продуктов переработки алюминиевых шлаков на производственной площадке ООО «НПФ «Металлон»

Дальнейшее развитие металлургического производства следует рассматривать с позиции безотходной металлургии. Эта проблема не ограничивается только возвращением в оборот металла из отходов. Ее решение кординально улучшит общие экологические показатели производства и позволит обеспечить дополнительно выпуск новых видов товарной продукции, получаемых ранее с использованием природного сырья. Необходимо сделать все возможное для реализации современной полноценной схемы создания добавленной стоимости при переработке отходов производства и в полной мере использовать концепцию No WASTE, т.е. в будущем вывозить за пределы предприятия только реально ценные материалы [7]. Постараемся более подробно раскрыть эту идею на примере переработки алюминиевых шлаков.

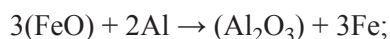
С целью эффективного извлечения алюминия из съемов и отвальных шлаков ООО НПФ «КОМ-ТЕРМ» был разработан процесс безотходной переработки алюминийсодержащих шлаков путем их плавки в дуговых печах с добавлением стального лома и флюсов, позволяющий получать в качестве целевых продуктов ферроалюминий и высокоглиноземистый синтетический шлак, пригодный для последующего использования в качестве рафинирующей смеси в сталеплавильном производстве. Реализация данной технологии в дуговых печах постоянного тока вместимостью 0,5 т позволила извлечь 98 % алюминия из шлака в сплав [8].

Авторы работы [9] предлагают использовать низкокачественные отходы алюминиевого производства: отсеы алюминиевой стружки, шлаки бесфлюсовой плавки, магнитную фракцию переработки лома и отходов для получения ферроалюминия, применяемого для раскисления стали. Полупромышленные испытания полученного ферроалюминия подтвердили экономическую и экологическую целесообразность данной технологии, поскольку, с одной стороны, в производстве используются низкокачественные дешевые отходы и затраты на их подготовку к плавке окупаются экономией алюминия, обычно применяемого для производства ферросплавов. С другой стороны, переработка части отвальных продуктов сокращает их объем, уменьшая загрязнение окружающей среды, и является шагом на пути к безотходной технологии.

Отходы переработки литейных шлаков широко применяют в сталеплавильном производстве [8–15]. Для внепечной десульфурации стали разработана шлаковая смесь Synaltex на основе извести и алюминиевого шлака, содержащая 60%  $Al_2O_3$ . Степень десульфурации мартеновской стали достигает 30%, электростали – 50%. При расходе смеси 10 кг/т затраты на нее не превышают 0,6% цены на сталь [15].

При производстве стали в кислородном конвертере, мартеновской и электродуговой печах применяют шлакообразующий реагент, где в качестве основного шлакообразующего вещества (30–94%) используют отходы алюминиевого производства, содержащие до 30%  $Al_2O_3$ . Это обеспечивает быстрое образование белого шлака, ускорение процесса десульфурации стали, а также сокращение восстановительного периода [15].

По мнению автора работы [12], использование отходов, образующихся в процессе производства вторичного алюминия, позволяет кратковременно снижать скорость обезуглероживания вследствие раскисления сталеплавильного шлака алюминием по реакции:



нагревать шлак, так как окисление алюминия сопровождается выделением тепла; снижать температуру плавления шлака и повышать его жидкоподвижность вследствие влияния  $Al_2O_3$ ; ускорять усвоение шлаком извести из-за повышения температуры шлака и снижения его вязкости, что сопровождается улучшением ее десульфурации. Поскольку условия удаления серы улучшаются, сокращается длительность плавки в целом. Учитывая, что при этом снижается расход других шлакообразующих добавок (например, боксита), использование отходов производства вторичного алюминия оказывается весьма рентабельным.

По результатам более чем 5000 плавок авторами работы [13] показано, что применение алюмошлаковых брикетов уменьшает продолжительность наведения рафинирующего шлака и внепечной обработки стали, снижает расход извести, металлического алюминия на раскисление и расход электроэнергии и огнеупоров, стабилизирует показатели десульфурации. Использование указанных брикетов способствует увеличению стойкости футеровки шлакового пояса ковшей и снижению расхода ковшовых огнеупоров.

Авторы патента Российской Федерации № 2396364С1 предлагают задействовать вновь образующиеся алюминиевые шлаки, и извлекаемые из существующих отвалов и захоронений, в производстве флюсов для раскисления, рафинирования, модифицирования и легирования стали.

Авторами работы [16] установлено, что обработка углеродистых и низколегированных сталей отходами алюминиевого производства обеспечивает глобуляризацию неметаллических включений и равномерное их распределение в металлической матрице, ослабление ликвации и химической неоднородности, снижение загрязненности, измельчение дендритной структуры и повышение ее однородности и плотности, упрочнение межкристаллических связей металлической основы за счет очищения границ зерен от вредных примесей.

Авторами работ [2, 6] предложены принципиальные схемы комплексной переработки оксидно-солевых отходов с получением покровно-рафинирующего флюса для вторичной металлургии алюминия и сплавов на основе алюминия и кремния для раскисления стали. Аналогичные продукты из алюмосодержащего шлака после его глубокой переработки предлагают получать и авторы патента Российской Федерации № 2449032. При этом глубокая переработка включает дробление и измельчение шлака до крупности 0,064–2,0 мм, водное выщелачивание его при расходе воды 1,05–2,5 л/кг в течение 20–60 мин в реакторе с механическим перемешиванием, фильтрование пульпы и выпаривание солевого раствора с получением готового покровного флюса влажностью 0,5–5,0%. Оксидный осадок после сушки подвергают электролизу в фторидно-хлоридном расплаве при температуре 910–990 °С и катодной плотности тока 0,55–1,2 А/см<sup>2</sup> с получением сплава на основе алюминия для раскисления стали или производства марочных алюминиевых сплавов.

В патенте Российской Федерации № 2409685С2 предлагается использовать мелкодисперсные отходы обогащения алюминиевых шлаков при получении гранул для разжижения сталеплавильных шлаков. Е. С. Махоткина [14] показала возможность вовлечения отходов производства вторичного алюминия (пыль, крупностью менее 0,1 мм и отсеvy шлака 0–3 мм) для получения глиноземистых шлаков доменной плавкой бокситов.

А. С. Тужилин [17] разработал аппаратные и технологические схемы комплексной переработки алюминийсодержащих отходов: стружки, шлака, гидроксидного осадка с получением глинозема, коагулянтов для очистки питьевой и сточной воды, стройматериалов. Реализация предлагаемых решений позволит существенно уменьшить отвалы и хранилища алюминийсодержащих отходов с извлечением

из них ценных компонентов, что окажет положительное влияние на экологическую и экономическую ситуацию в различных регионах Российской Федерации. В работе [18] предлагается перерабатывать алюминийсодержащие шлаки путем отмывки их водой с последующей сушкой полученного осадка, его измельчения до получения пудры, которую используют в качестве газообразователя при изготовлении бетонной смеси.

С. А. Рязанов [19, 20] показал возможность использования отходов переработки алюминиевых шлаков в формовочных и стержневых смесях, огнеупорных бетонах и кокильных красках, а авторы работы [21] рекомендуют шлак в качестве антипригарных покрытий форм и стержней для стального и чугунного литья. Эффективность действия таких покрытий связана с газовыми затворами в их структуре, противодействующими проникновению расплава. По качеству покрытия не уступают противопригарным краскам на основе маршаллита и цирконового концентрата, а по стоимости они существенно ниже. В работе [22] установлена принципиальная возможность использования алюминиевых шлаков для формирования керамической оболочки при литье по выплавляемым моделям. При этом качество поверхности отливок из цветных сплавов выше, чем при использовании плавленного кварца.

В работе [15] установлена возможность использования шлаков вторичного переплава алюминия в качестве сырья для получения глиноземистого цемента без изменения его качества и технологии изготовления.

Вместе с тем, следует отметить, что вовлечение этого вторичного сырья в производство встречает значительные трудности технологического и экологического характера. Ввиду сравнительно низкого содержания металлизированной фракции шлак требует обогащения, при котором много металла теряется с мелкими фракциями, как при повторном переплаве концентрата, – суммарно 13–20% от исходного содержания [23]. Утилизация мелких фракций крайне затруднительна из-за их сложного и непостоянного вещественного состава. Например, в 2003 г. при добавке пыли от механического обогащения алюминиевого шлака Подольского завода в шихту для производства керамзита марочность керамзита повысилась с 400 до 600, а использование пыли того же завода в 2005 г. дало крайне нестабильные результаты. Применение для тех же целей пыли пермской фирмы «Алур», специализирующейся на переработке шлаков пермского ломоперерабатывающего предприятия и привозных шлаков, положительных результатов не дало [23].

Одним из перспективных направлений реализации шлаков является их использование для очистки сточных вод от сульфата кальция [10, 15], а отсеы фракции 3 мм, получаемые при механической переработке алюминиевых шлаков, могут быть задействованы для производства оксихлорида алюминия, обладающего высокими основностью и коагулирующими свойствами при очистке сточных вод промышленных производств [15]. Солевые отходы предлагается использовать в качестве минерализатора растворов при бурении нефтяных скважин [10].

Авторы работы [24] предлагают схему безотходной технологии переработки вторичных алюминиевых дрессов, по которой получают гидроксид алюминия, используемый для коррекции молярного отношения Al:Cl в оксихлоридных растворах алюминия, и содержащий более 80%  $Al_2O_3$ , который можно задействовать в производстве огнеупорных материалов. В качестве компонента с добавками песка и других элементов алюминиевый шлак может служить заполнителем жаростойкого бетона. При использовании тонкомолотого заполнителя более 5–10% (шлак – 70%, песок – 30%), содержащего более 30% оксида алюминия и высокоглиноземистого цемента, в работе [25] были получены образцы керамических огнеупорных материалов пористостью 25–30% с пределом прочности 25–30 МПа.

В зависимости от фракционного состава алюминиевый шлак может найти применение как активная тонкомолотая добавка на фосфатном связующем для производства керамических огнеупорных материалов, применяемых в литейном производстве алюминиевых сплавов [25]. Технология формования определяется назначением и условиями эксплуатации. Такие материалы отличаются высокой термостойкостью, шлакоустойчивостью и пригодны для футеровки индукционных печей и изделий литниковой системы (утеплители прибыли) [25], а также могут быть предложены в качестве клеевых растворов и обмазок футеровки тиглей и для защиты чугунных тиглей и плавильно-заливочного инструмента.

Таким образом, алюминиевые шлаки и продукты их переработки находят применение в черной металлургии, строительстве, литейном производстве, химической и других отраслях промышленности. Вместе с тем, следует отметить, что основным потребителем продуктов, полученных на основе алюминиевых шлаков, являются предприятия черной металлургии. В таблице приведены результаты обзора литературы по способам обработки стали отходами алюминия.

## Результаты обзора литературы по способам обработки стали отходами алюминия

Состав материала или сущность способа обработки	Страна	Источник информации
Брикет для раскисления стали получают прессованием алюминиевой стружки с частицами добавки, в качестве которой используют хлоридно-фторидный флюс в количестве 2–5 мас. %	Россия	Патент 2336313С1
Флюс для раскисления, рафинирования, модифицирования и легирования стали в виде шлака алюминиевого производства, содержащего, мас. %: алюминий – 1,0–60,0; оксиды алюминия – 1,00–50,0; оксид кальция – 0,28–1,0; оксид магния – 1,0–10,0; оксид железа – 1,0–9,0; оксид кремния – 1,0–16,0; оксиды меди – 0,1–10,0; оксид марганца – 0,1–2,0; оксид цинка – 0,2–12,0; оксид свинца – 0,01–0,15; оксид никеля – 0,01–0,15; оксид хрома – 0,05–0,5; хлорид натрия – 0,1–40,0; хлорид калия – 0,1–40,0	Россия	Патент 2396364С1
Шлакообразующая смесь: известь, плавиковый шпат, смесь гранулированная глиноземсодержащая (оксиды алюминия, кремния, кальция, алюминий металлический до 10%, оксиды щелочных металлов в сумме до 6%), раскислители шлака (гранулированный алюминий и алюминиевый концентрат из твердошлаковых отходов переплава алюминиевых сплавов, содержащий оксиды алюминия, кремния, кальция, металлический алюминий и хлориды щелочных металлов), алюмошлаковый брикет (АШБ), содержащий, мас. %: CaO – 25–30; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 15–35; SiO <sub>2</sub> – 15–20; MgO – 2–8; Al – 15–20, связующее	Россия	[13]
Алюминиевая раскислительная смесь (АРС-1), содержащая, мас. %: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – ≥ 50,0; Al – ≥ 20,0; С – ≤ 6,0; (K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O) – 8,0; SiO <sub>2</sub> – ≤ 10,0; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – ≤ 10,0; массовая доля частиц размером 0–30 мм, % – не менее 80; 30–50 мм не более 20	Беларусь	ТУ ВУ 700028768.003-2008
Глиноземсодержащий продукт (отходы Вторцветмета), мас. %: Al 8–15; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 30–50; SiO <sub>2</sub> – 12–20; соли или оксиды натрия и калия – 12–23; примеси – остальное	Украина	[26]
Смесь для внепечной десульфурации стали, содержащая известь и алюминиевый шлак с 60% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	СССР	[15]
Алюминиевая раскислительная смесь (АРС-2), содержащая, мас. %: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – ≥ 30,0; Al – ≥ 20,0; С – ≤ 6,0; (K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O) – 8,0; SiO <sub>2</sub> – ≤ 10,0; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – ≤ 10,0; массовая доля частиц размером 0–30 мм, % – не менее 80; 30–50 мм не более 20	Беларусь	ТУ ВУ 700028768003-2008
Брикетированная смесь, используемая для наведения синтетического рафинировочного шлака на установке печь-ковш, состоящая из 30% отработанных катализаторов нефтехимического производства после выщелачивания, 30% CaO, 25% (CaMg)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> и 15% алюминиевой стружки	Россия	[27]
Шлак производства вторичного алюминия, содержащий, %: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 50–70; SiO <sub>2</sub> – ≤ 8,0; CaO – 4,0–6,0; FeO – 6,0–8,0; (K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O) – 2,0–4,0; Al – 8,0–15,0 используется: а) для кратковременного снижения скорости обезуглероживания вследствие раскисления сталеплавильного шлака алюминием по реакции 3(FeO) + 2Al = (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) + 3Fe; б) для нагрева шлака, так как окисление алюминия сопровождается выделением тепла; в) для снижения температуры плавления шлака и повышения его жидкотекучести вследствие влияния Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; г) для ускорения усвоения шлаком извести вследствие повышения температуры шлака и снижения его вязкости, что сопровождается улучшением условий десульфурации	Россия	[17]
Способ получения гранул для разжижения сталеплавильных шлаков, включающий окомкование мелкодисперсных отходов обогащения алюминиевых шлаков в гранулы, загрузку порции гранул в обжиговое оборудование шахтного типа слоем не менее 1м, розжиг с помощью горелки нижних слоев гранул до температуры 840 °С в течение не более 5 мин для запуска процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, подачу воздуха в зону горения, обжиг и выпуск порции готовых гранул, имеющих следующий состав, мас. %: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 50–60; Al <sub>Me</sub> – 3–5; SiO <sub>2</sub> – 6–8; P – не более 0,2; S – не более 0,2; N – до 1,0; оксиды и хлориды металлов – остальное	Россия	Патент 2409685С2
Состав глиноземсодержащего материала «Рантал 50 гр», содержащего, мас. %: 1,98 – TiO <sub>2</sub> ; 72,1 – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 20 – SiO <sub>2</sub> ; 0,71 – CaO; 0,70 – MgO; 2,05 – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 0,52 – Na <sub>2</sub> O; 0,31 – K <sub>2</sub> O; 2,95 – примеси	Россия	[28]
Состав глиноземсодержащих брикетов ОООН «РОИС», содержащих, мас. %: 3,3 – Al; 55,7 – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 6,04 – SiO <sub>2</sub> ; 1,91 – CaO; 12,6 – MgO; 2,77 – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 4,3 – Na <sub>2</sub> O; 3,7 – K <sub>2</sub> O; 8,1 – хлориды; 11,9 – примеси	Россия	[28]
Составы разжижителей шлака марки АСМ, содержащие, мас. %: 50–80 – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 2–3 – SiO <sub>2</sub> ; 1–15 – CaO; 4–17 – MgO; 1–2 – (K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O)	Чехия	[29]
Составы разжижителей шлака марки АСМС, содержащие, мас. %: 50–70 – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 2–3 – SiO <sub>2</sub> ; 5–13 – CaO; 3–9 – MgO; 2–6 – Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 1–3 – (K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O)	Чехия	[29]
Добавка МША для наведения рафинировочных шлаков, содержащая, мас. %: 15–25 – Al; ≥ 50 – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; ≤ 8 – SiO <sub>2</sub> ; ≤ 0,2 – S; ≤ 0,2 – P; ≤ 10 – (NaCl + KCl); ≤ 10 – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; ≤ 10 – (MnO + MgO)	Россия	[30]
Способ приготовления флюса на основе вторичного алюмосодержащего шлака, содержащего, мас. %: 5,0–25,0 – Al; 30,0–70,0 – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 4,0–10,0 – SiO <sub>2</sub> ; 5,0–10,0 – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 1,0–20,0 – CaO; 1,0–20,0 – MgO; 0,055–0,825 – SrO; 0,16–2,40 – BaO; 1,0–8,0 – (K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O)	Беларусь	Евразийский патент № 037174

Как следует из приведенного обзора, отходы от переработки вторичного алюминия широко используются в металлургии стали и преимущественно при ее выпечной обработке.

Требования по загрязненности стали вредными примесями и неметаллическими включениями постоянно ужесточаются. Например, для сталей энергетического машиностроения за последние 50 лет допустимые концентрации по сере снижены в 15 раз, а по фосфору – в 12 раз и составляют в настоящее время соответственно 0,002 и 0,003 % [31]. Наиболее высокие показатели десульфурации обеспечиваются при обработке стали синтетическими шлаками на основе CaO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При этом носителем оксида алюминия в синтетических шлаках, как правило, выступают отходы от переработки вторичного алюминия или отвалы алюминиевые шлаки. Вместе с тем, отходы от переработки вторичного алюминия содержат в своем составе значительное количество хлоридов натрия и калия, которые в условиях обработки стали при температуре 1590–1650 °С обладают высокой летучестью и существенно ухудшают условия труда рабочих. Это является основным сдерживающим фактором широкого использования раскислительных смесей и синтетических шлаков на основе отходов переработки вторичного алюминия [32].

Из данной ситуации возможны два выхода. Во-первых, можно использовать бесфлюсовую плавку отходов алюминия, что исключит загрязнение образующихся шлаков хлоридом натрия и калия. Во-вторых, можно использовать мелкую фракцию (менее 8 мм) отвалы шлаков, длительное хранение которых на открытой площадке способствует окислению остаточного алюминия до Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и вымыванию остатков солевых флюсов до содержания 1,0–1,5 %.

Для некоторых марок сталей не допускается ее раскисление алюминием, что требует снижения его содержания во вводимых реагентах, в том числе и в шлакообразующих смесях. Отделить корольки алюминия от шлаков можно вихревой сепарацией с использованием ленточного конвейера с многополюсным магнитным ротором. При вращении многополюсной магнитной системы в частицах металлического алюминия индуцируются вихревые токи, которые, в свою очередь, создают магнитное поле, противоположное по направлению роторной магнитной системе. В результате взаимодействия магнитных полей металлические частицы алюминия выбрасываются из движущегося потока и отделяются от электропроводящей фракции.

Такая подготовка отвального шлака позволяет полностью извлечь из него металлический алюминий, который в дальнейшем можно использовать для производства раскислителей в виде чушки или «пирамидок». Неэлектропроводящая фракция отвального шлака, содержащего более 75 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, сплавляется с известью для получения синтетического шлака или используется при производстве разжижителей рафинировочного шлака [32].

С целью усиления рафинирующего действия и модифицирования неметаллических включений в сталях к смеси CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> целесообразно добавлять барий-стронциевый карбонат БСК-2 в количестве до 15 мас. %.

Таким образом, использование в сталеплавильном производстве техногенных отходов от плавки вторичного алюминия в режиме рециклинга вторичных ресурсов является существенным резервом повышения эффективности металлургического производства и позволяет решить ряд экологических, экономических и социальных вопросов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров, Г.С. Состояние и проблемы вторичного алюминия в России (по материалам 7-й Международной конференции «Алюминий-21/Рециклинг») / Г.С. Макаров // Цветные металлы. 2019. № 2. С. 79–84.
2. Лысенко, А.П. Использование комплексной технологии переработки шлаков алюминиевой промышленности для последующего раскисления стали / А.П. Лысенко, Е.А. Шевченко // Цветные металлы. 2020. № 3. С. 63–67.
3. Загрязнение атмосферы при хранении шлаков вторичной переработки алюминия / А.С. Панасюгин [и др.] // Литье и металлургия. 2013. № 1. С. 66–69.
4. Повышение экологической безопасности процессов плавки и рафинирования алюминиевых сплавов / С.П. Задруцкий [и др.]. Минск: БНТУ, 2012. 231 с.
5. Лысенко, А.П. Переработка низкосортного глинозема для получения раскислителей стали в алюминиевых электролизерах / А.П. Лысенко, Р.С. Сельницын // Цветные металлы. 2015. № 3. С. 14–19.
6. Лысенко, А.П. Задачи и перспективы переработки оксидно-солевых отходов вторичной металлургии алюминия / А.П. Лысенко, Д.С. Пузанов // Вест. МГОУ. Сер. Техника и технология. 2011. № 3. С. 10–14.
7. Люнген, Х.Б. Гибкие решения в сталелитейной отрасли для сокращения выбросов CO<sub>2</sub> и повышения эффективности производства / Х.Б. Люнген, М. Шпрехер // Черные металлы. № 11. 2017. С. 64–71.
8. Нехамин, С.М. Плавка алюминиевых сплавов и отвальных шлаков в дуговых печах постоянного тока / С.М. Нехамин, М.М. Крутянский // Цветные металлы. 2006. № 9. С. 113–115.
9. Перспективы использования в черной металлургии ферроалюминия, полученного из низкокачественных отходов алюминиевого производства / А.И. Сачко [и др.] // Цветные металлы. 1986. № 8. С. 78–79.

10. **Кольцова, В. Я.** О безотходной технологии на предприятиях вторичной металлургии / В. Я. Кольцова, А. М. Апанасенко, В. З. Колесник // Цветные металлы. 1991. № 11. С. 51–52.
11. **Новичков, С. Б.** Теория и практика переработки отходов алюминия в роторных наклонных печах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / С. Б. Новичков, Иркутск. гос. тех. ун-т. Иркутск, 2007. 40 с.
12. **Кудрин, В. А.** Теория и технология производства стали / В. А. Кудрин. М.: Мир, 2003. 528 с.
13. Применение алюмошлаковых брикетов при внепечной обработке стали на Ашинском металлургическом заводе / М. Т. Гиндулин [и др.] // Сталь. 2011. № 8. С. 28–30.
14. **Махоткина, Е. С.** Применение отходов производства вторичного алюминия при получении глиноземистых шлаков доменной плавкой бокситов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск. гос. техн. ун-т. Магнитогорск, 2011. 19 с.
15. **Захаров, В. А.** Использование алюминийсодержащих шлаков и отходов их переработки / В. А. Захаров, Н. И. Артемьев, В. З. Колесник // Цветные металлы. 1986. № 7. С. 80–81.
16. **Горелов, В. Г.** Рафинирование сталей отходами алюминиевого производства / В. Г. Горелов, Г. П. Ким, Р. П. Машков // Литейное производство. 1999. № 11. С. 27–28.
17. **Тужилин, А. С.** Физико-химические и технологические исследования комплексной переработки алюминийсодержащих отходов: стружки, шлака, гидроксидного осадка: автореф. дис. ... канд. техн. наук. ИМет. РАН. М., 2012. 21 с.
18. **Козлов, А. А.** Металлургия вторичного алюминия / А. А. Козлов, Н. В. Немчинова // Перспективы развития технологии переработки углеводородных, растительных и минеральных ресурсов: материалы 4-й Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 24–25 апреля 2014. Иркутск, 2014. С. 76–78.
19. **Рязанов, С. А.** Технологии утилизации алюминиевых шлаков / С. А. Рязанов // Вторичные металлы. 2009. № 2. С. 54–56.
20. **Рязанов, С. А.** О комплексной переработке алюминиевых шлаков / С. А. Рязанов // Литейщик России. 2010. № 7. С. 43–45.
21. **Леушен, И. О.** Разработка эффективных противопригарных покрытий литейных форм на основе алюмошлаковых наполнителей / И. О. Леушен, А. И. Грачев // Литейное производство. 2002. № 4. С. 13–14.
22. **Соколов, А. В.** Литье по выплавляемым моделям с использованием продуктов переработки алюминиевых шлаков / А. В. Соколов, С. А. Рязанов, Н. Н. Зонненберг // Литейное производство. 2012. № 7. С. 31–32.
23. **Гель, В. И.** Переработка упорного вторичного алюминиевого и медного сырья во вращающихся печах / В. И. Гель, Ю. Н. Вензига, В. Б. Родионов // Цветные металлы. 2006. № 3. С. 56–59.
24. **Lucheva, V.** Non-waste aluminum dross recycling / V. Lucheva, Ts. Tsonev, R. Petkov // J. Univ. Chem. Technol and Met. 2005. Vol. 40. No 4. P. 335–338.
25. **Волочко, А. Т.** Переработка и использование алюминиевых отходов в производстве порошков, паст, композиционных и керамических материалов / А. Т. Волочко. Минск: Белорусская наука, 2006. 302 с.
26. **Пронский, Л. И.** Технология обработки стали собственными печными шлаками / Л. И. Пронский, Ю. Н. Ткачев, Н. В. Полядко // Неметаллические включения и газы в литейных сплавах: материалы V респ. науч.-техн. конф. Запорожье, 6–8 сент. 1988. Запорожье: ЗМИ, 1988. С. 126–127.
27. **Павлов, А. В.** Способы утилизации отработанных молибденсодержащих катализаторов нефтехимического синтеза / А. В. Павлов, В. С. Римошевский // Изв. высш. учеб. завед. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 1. С. 5–10.
28. Повышение стойкости футеровки агрегатов внепечной обработки стали / А. А. Метелкин [и др.]. Нижний Тагил: НТИ УрФУ, 2015. 144 с.
29. Рекламный проспект фирмы JAP TRADING, s.r.o. RCz. 7 с.
30. **Леонтьев Л. И.** Переработка и утилизация техногенных отходов металлургического производства / Л. И. Леонтьев, В. И. Пономарев, О. Ю. Шешуков // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 3. С. 24–27.
31. **Еланский, Д. Г.** Обзор докладов на пленарном заседании XIV международного конгресса сталеплавыльщиков / Д. Г. Еланский, Г. Н. Еланский // Сталь. 2016. № 11. С. 21–29.
32. **Трибушевский, Л. В.** Безотходная технология переработки окисленных отходов алюминия в короткопламенной роторной печи бесфлюсовой плавкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Белорус. нац. техн. ун-т. Минск, 2021. 21 с.

## REFERENCES

1. **Makarov G.S.** Sostoyaniye i problemy vtorichnogo alyuminiya v Rossii (po materialam 7-y Mezhdunarodnoy konferentsii "Alyuminiy-21/Retsikling") [The state and problems of secondary aluminum in Russia (based on the materials of the 7th International Conference "Aluminum-21 / Recycling")]. *Tsvetnyye metally = Non-ferrous metals*, 2019, no. 2, pp. 79–84.
2. **Lysenko A.P., Shevchenko E. A.** Ispol'zovaniye kompleksnoy tekhnologii pererabotki shlakov alyuminiyevoy promyshlennosti dlya posleduyushchego raskisleniya stali. [The use of integrated technology for processing slags of the aluminum industry for the subsequent deoxidation of steel]. *Tsvetnyye metally = Non-ferrous metals*, 2020, no. 3, pp. 63–67.
3. **Panasyugin A.S., Mikhalap D.P., Panasyugin S.A., Pavlovskiy N.D., Chipurko Z.N.** Zagryazneniye atmosfery pri khraneniі shlakov vtorichnoy pererabotki alyuminiya [Pollution of the atmosphere during storage of slag secondary processing of aluminum]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 1, pp. 66–69.
4. **Zadrutsky S.P., Nemenenok B.M., Rumyantseva G.A., Sletova N.V.** Povysheniye ekologicheskoy bezopasnosti protsessov plavki i rafinirovaniya alyuminiyevykh splavo. [Increasing the ecological safety of the processes of melting and refining of aluminum alloys]. Minsk, BNTU Publ., 2012. 231 p.
5. **Lysenko A.P., Selnitsyn R.S.** Pererabotka nizkosortnogo glinozema dlya polucheniya raskisliteley stali v alyuminiyevykh elektrolizerakh [Processing of low-grade alumina for obtaining deoxidizers of steel in aluminum electrolyzers]. *Tsvetnyye metally = Non-ferrous metals*, 2015, no. 3, pp. 14–19.
6. **Lysenko A.P., Puzanov D.S.** Zadachi i perspektivy pererabotki oksidno-solevykh otkhodov vtorichnoy metallurgii alyuminiya [Tasks and prospects for the processing of oxide-salt waste from secondary metallurgy of aluminum]. *Vestnik MGOU. Ser. Tekhnika i tekhnologiya = Bulletin MGOU. Technique and technology*, 2011, no. 3, pp. 10–14.

7. **Lyngen Kh.B., Shprekher M.** Gibkiye resheniya v staliteynoy otrasli dlya sokrashcheniya vybrosov CO<sub>2</sub> i povysheniya effektivnosti proizvodstva [Flexible solutions in the steel industry to reduce CO<sub>2</sub> emissions and increase production efficiency]. *Chernye metally = Black metals*, 2017, no. 11, pp. 64–71.
8. **Nekhamin S.M., Krutyanskiy M.M.** Plavka alyuminiyevykh splavov i otval'nykh shlakov v dugovykh pechakh postoyannogo toka [Melting of aluminum alloys and dump slags in DC arc furnaces]. *Tsvetnye metally = Non-ferrous metals*, 2006, no. 9, pp. 113–115.
9. **Sachko A.J., Artemev N.I., Mikulyak O.P., Baranov A.A., Ladyan V.J.** Perspektivy ispol'zovaniya v chornoy metallurgii ferroaluminiuma, poluchennogo iz nizkokachestvennykh otkhodov alyuminiyevogo proizvodstva [Prospects for the use in ferrous metallurgy of ferroaluminium obtained from low-quality wastes of aluminum production]. *Tsvetnye metally = Non-ferrous metals*, 1986, no. 8, pp. 78–79.
10. **Koltsova V.Ya., Apanasenko A.M., Kolesnik V.Z.** O bezotkhodnoy tekhnologii na predpriyatiyakh vtorichnoy metallurgii [On the hopeless technology at the enterprises of secondary metallurgy]. *Tsvetnye metally = Non-ferrous metals*, 1991, no. 11, pp. 51–52.
11. **Novichkov S.B.** *Teoriya i praktika pererabotki otkhodov alyuminiya v rotornykh naklonnykh pechakh. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Theory and practice of processing aluminum waste in rotary tilting furnaces: abstract of thesis]. Irkutsk, 2007.
12. **Kudrin V.A.** *Teoriya i tekhnologiya proizvodstva stali* [Theory and technology of steel production]. Moscow, Mir Publ. 2003. 528 p.
13. **Gindulin M.T., Fedotov S.V., Shakirov Z.Kh., Gerner V.I., Obpezkov V.V., Senin A.V.** Primeneniye alyumoshlakovykh briketov pri vnepechnoy obrabotke stali na Ashinskoy metallurgicheskoy zavode [The use of aluminoslag brackets in out-of-furnace steel processing at the Ashinskiy metallurgical plant]. *Stal = Steel*, 2011, no. 8, pp. 28–30.
14. **Makhotkina E.S.** *Primeneniye otkhodov proizvodstva vtorichnogo alyuminiya pri poluchenii glinozemistykh shlakov domennoy plavkoy boksitov. Diss. kand. tekhn. nauk.* [The use of waste from the production of secondary aluminum in the production of alumina slags by blast-furnace smelting of bauxite]. Magnitogorsk, 2011.
15. **Zakharov V.A., Artemev N.I., Kolesnik V.Z.** Ispol'zovaniye alyuminiysoderzhashchikh shlakov i otkhodov ikh pererabotki [Use of aluminum-containing slags and waste of their processing]. *Tsvetnye metally = Non-ferrous metals*, 1986, no. 7, pp. 80–81.
16. **Gorelov V.G., Kim G.P., Mashkov R.P.** Rafinirovaniye staley otkhodami alyuminiyevogo proizvodstva [Refining of steels by waste of aluminum production]. *Liteynoe proizvodstvo = Foundry production*, 1999, no. 11, pp. 27–28.
17. **Tuzhilin A.S.** *Fiziko-khimicheskiye i tekhnologicheskiye issledovaniya kompleksnoy pererabotki alyuminiysoderzhashchikh otkhodov: struzhki, shlaka, gidrooksidnogo osadka. Diss. kand. tekhn. nauk* [Physicochemical and technological research of complex processing of aluminum-containing waste: shavings, slag, hydroxide sludge]. Moscow, 2012.
18. **Kozlov A.A., Nemchinova N.V.** Metallurgiya vtorichnogo alyuminiya [Metallurgy of secondary aluminum]. *Materialy 4 Vserossiyskoy nauch.-prakt. konf. «Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglevodorodnykh, rastitelnykh i mineralnykh resyrsov* [Prospects for the development of technology for the processing of hydrocarbon, plant and mineral resources: materials of the 4th All-Russian scientific-practical]. Irkutsk, 2014, pp. 76–78.
19. **Ryazanov S.A.** Tekhnologii utilizatsii alyuminiyevykh shlakov [Technologies for utilization of aluminum slag]. *Vtorichnye metally = Secondary metals*, 2009, no. 2, pp. 54–56.
20. **Ryazanov S.A.** O kompleksnoy pererabotke alyuminiyevykh shlakov [On the complex processing of aluminum slag]. *Liteyschik Rossii = Foundry of Russia*, 2010, no. 7, pp.43–45.
21. **Leushen I.O., Grachev A.I.** Razrabotka effektivnykh protivoprigarnykh pokrytiy liteynykh form na osnove alyumoshlakovykh napolniteley [Development of effective non-stick coatings for casting molds based on aluminoslag fillers]. *Liteynoe proizvodstvo = Foundry production*, 2002, no. 4, pp. 13–14.
22. **Sokolov A.V., Ryazanov S.A., Sonnenberg N.N.** Lit'ye po vyplavlyayemykh modelyam s ispol'zovaniyem produktov pererabotki alyuminiyevykh shlakov [Investment casting with the use of products of processing of aluminum slag]. *Liteynoe proizvodstvo = Foundry production*, 2002, no. 7, pp. 31–32.
23. **Gel V.I., Venziga Yu.N., Rodionov V.B.** Pererabotka upornogo vtorichnogo alyuminiyevogo i mednogo syr'ya vo vrashchayushchikhsya pechakh [Processing of refractory secondary aluminum and copper raw materials in rotary furnaces]. *Tsvetnye metally = Non-ferrous metals*, 2006, no. 3, pp. 56–59.
24. **Lucheva B., Tsonev Ts., Petkov R.** Non-waste aluminum dross recycling. *J. Univ. Chem. Technol. and Met.* 2005, vol. 40, no. 4, pp. 335–338.
25. **Volochko A.T.** *Pererabotka i ispol'zovaniye alyuminiyevykh otkhodov v proizvodstve poroshkov, past, kompozitsionnykh i keramicheskikh materialov* [Processing and use of aluminum waste in the production of powders, pastes, composite and ceramic materials]. Minsk, Belaruskaya nayka Publ., 2006, 302 p.
26. **Pronsky L.I., Tkachev Yu.N., Polyadko N.V.** *Tekhnologiya obrabotki stali sobstvennymi pechnymi shlakami* [Processing technology became our own furnace slags]. *Materialy V respublikanskoj nauch.-tekhn. konf. «Nemetallicheskiye vklucheniya i gazy v liteynykh splavakh»* [Nonmetallic inclusions and gases in casting alloys: materials of the V republican scientific. tech. conf]. Zaporozhye, 1988, pp. 126–127.
27. **Pavlov A.V., Rimoshevsky V.S.** Sposoby utilizatsii otrabotannykh molibdensoderzhashchikh katalizatorov neftekhimicheskogo sinteza [Methods of utilization of waste molybdenum-containing crystallizers of petrochemical synthesis]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya = Proceedings of nigh schools. Ferrous metallurgy*, 2016, vol. 59, no. 1, pp. 5–10.
28. **Metelkin A.A., Sheshukov O. Yu., Nekrasov I.V., Shevchenko O.I.** *Povysheniye stoykosti futerovki agregatov vnepechnoy obrabotki stali* [Increasing the lining resistance of out-of-furnace steel processing units]. Nizhny Tagil, NTI UrFU Publ., 2015, 144 p.
29. Reklamny prospect firmy JAP TRADING, s.r.o. RCz. 7 p.
30. **Leontiev L.I., Ponomarev V.I., Sheshukov O. Yu.** Pererabotka i utilizatsiya tekhnogennykh otkhodov metallurgicheskogo proizvodstva [Processing and utilization of technogenic waste of metallurgical production]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*, 2016, vol. 20, no. 3, pp. 24–27.
31. **Elansky D.G., Elansky G.N.** Obzor dokladov na planarnom zasedanii XIV mezhdunarodnogo kongressa staleplavil'shchikov [Review of reports at the planar meeting of the XIV International Congress of Steel Smelters]. *Stal = Steel*, 2016, no. 11, pp. 21–29.
32. **Tribushevsky L.V.** Bezotkhodnaya tekhnologiya pererabotki oksilennykh otkhodov alyuminiya v korotkoplamennoy rotornoy pechi besflyusovoy plavkoy. Dis. kand. tekhn. nauk. Waste-free technology for processing oxidized aluminum wastes in a short-flame rotary furnace with flux-free melting]. Minsk, 2021.