

Научная статья
УДК 658.567.1
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.036

ШЛАКИ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ КАК ОБЪЕКТ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ

Леонид Андреевич Смирнов¹, Борис Леонидович Демин²

^{1, 2}Уральский институт металлов, Екатеринбург, Россия

¹smirnov@uim-stavan.ru

²b.demin@uim-stavan.ru

Аннотация

Приведены основные технологические решения по переработке шлаков черной металлургии. Показано, что технология переработки шлаков включает два основных передела: первичную переработку, связанную с обращением с жидким шлаком, выпуском его из печи, транспортировкой, охлаждением (грануляцией, поризацией, волоконообразованием, литьем и т. п.), и вторичную, включающую операции, связанные с затвердевшим шлаком на отвалах и дробильно-сортировочных установках (ДСУ). Переработка шлаков черной металлургии пополняет сырьевую базу стройиндустрии, возвращает в металлургическое производство до 30 % сталеплавильных шлаков и весь объем извлеченных металлических включений. Современные требования экономики и охраны окружающей среды требуют создания и внедрения технологий и оборудования по переработке шлаков в жидком виде, улучшения качества продукции на этапе первичной переработки. К настоящему времени разработаны основные технологические решения по массовой переработке шлаков, что позволяет ставить задачу по полному переводу предприятий черной металлургии на работу без шлаковых отвалов.

Ключевые слова:

шлаки черной металлургии, технология переработки, направления использования

Для цитирования:

Смирнов Л. А., Демин Б. Л. Шлаки черной металлургии как объект комплексной переработки // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 1. С. 201–209. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.036.

Original article

SLAG OF FERROUS METALLURGY AS AN OBJECT OF COMPLEX PROCESSING

Leonid A. Smirnov¹, Boris L. Demin²

^{1, 2}Ural Institute of Metals, Yekaterinburg, Russia

¹smirnov@uim-stavan.ru

²b.demin@uim-stavan.ru

Abstract

The main technological solutions for the processing of slag of ferrous metallurgy are given. It is shown that the technology of slag processing includes two main stages: primary processing associated with the handling of liquid slag, its release from the furnace, transportation, cooling (granulation, porization, fiber formation, casting, etc.) and secondary including operations related to hardened slag on dumps and crushing and screening plants (CSU). The processing of slag from ferrous metallurgy replenishes the raw material base of the construction industry, returns up to 30 % of steelmaking slag and the entire volume of extracted metal inclusions to metallurgical production. Modern requirements of economics and environmental protection require the creation and implementation of technologies and equipment for the processing of slag in liquid form, improving the quality of products at the stage of primary processing. To date, main technological solutions for the large-scale processing of slag have been developed. This makes it possible to set the goal of completely transitioning ferrous metallurgy enterprises to operating without slag dumps.

Keywords:

slags of ferrous metallurgy, processing technology, directions of use

For citation:

Smirnov L. A., Demin B. L. Slag of ferrous metallurgy as an object of complex processing // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 201–209. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.036.

Самым массовым отходом металлургического передела — а по определению академика И. П. Бардина, вторичным продуктом — являются шлаки. По оценке, их доля составляет около 80 % отходов металлургического производства. Общий выход шлаков на предприятиях черной металлургии

России превышает 33 млн тонн в год, в том числе ориентировочно: доменных — 16,0; сталеплавильных — 14; ферросплавных и прочих — 3. Удельный выход и химсостав шлаков определяются в первую очередь способом производства металла и качеством сырья. Обычно в доменных шлаках содержится, %: CaO — 30–45; SiO₂ — 30–42; MgO — 4–13; Al₂O₃ — 6–16; Fe металлическое — 2–4; в конвертерных шлаках: CaO — 41–56; SiO₂ — 11–22; MgO — 2–5; MnO — 3–6; FeO — 8–27, Fe металлическое — до 12; в электросталеплавильных: CaO — 30–55; SiO₂ — 15–30; MgO — 10–20; FeO — 0,5–14, Fe металлическое — до 27. Свойства шлаков определяют способы их переработки, направление использования и получения конкретной продукции. В частности, шлаки сталеплавильного производства являются «короткими» и имеют при выпуске относительно небольшой перегрев, их переработка в жидком виде требует внедрения специальных устройств, технологий и затрат.

Технология переработки шлаков включает два основных передела: первичную переработку, связанную с обращением с жидким шлаком, выпуском его из печи, транспортировкой, охлаждением (грануляцией, поризацией, волокнообразованием, литьем и т. п.), и вторичную, включающую операции, связанные с затвердевшим шлаком на отвалах и ДСУ. Основной задачей технологии шлакопереработки является обеспечение работы металлургических заводов без шлаковых отвалов с повышением качества и полной утилизацией шлаковой продукции. Доменные шлаки перерабатывают преимущественно в жидком виде путем грануляции расплава на придоменных или отдельно стоящих (центральных) установках с получением гранулированного шлака, который используется для производства цемента. Часть расплава слоями сливают в траншеи и за счет регламентированного охлаждения получают литой щебень с последующей разделкой остывшего шлака экскаватором. Ковшовые остатки (коржи) перерабатывают после остывания путем дробления и сортировки на фракции на ДСУ. Производство других видов продукции (шлаковой пемзы, ваты, литья и др.) невелико и в последнее время сокращается. Использование воды для охлаждения шлакового расплава приводит к ряду недостатков: перерасходу воды, высокой (до 20 %) влажности продукции, наличию в парогазовых выбросах токсичных сернистых соединений, концентрация которых превышает предельно допустимые нормы. Применяемые приемы защиты окружающей среды от сернистых выбросов при переработке доменных шлаков не обеспечивают соблюдение нормативов ПДВ.

Получение продукции из сталеплавильных и ферросплавных шлаков осуществляют по двухстадийной технологии. Первичная переработка производится методом термодробления путем охлаждения шлака водой при температурах выше порога дробимости. За счет температурных напряжений, возникающих в шлаковых монолитах, происходит их разрушение и раскрытие металлических включений. Крупные металлические включения извлекают в шлаковых дворах и траншеях перед отгрузкой шлака на вторичную переработку. Остывший шлак подают на ДСУ для производства фракционированного щебня, песка, щебеночно-песчаных смесей и извлечения металла. К основным недостаткам переработки сталеплавильных и ферросплавных шлаков следует отнести потери металла, особенно немагнитного, и выбросы пыли, превышающие установленные нормативы ПДВ. Переработка шлаков черной металлургии пополняет сырьевую базу стройиндустрии, возвращает в металлургическое производство до 30 % сталеплавильных шлаков и весь объем извлеченных металлических включений.

Шлаки при охлаждении и хранении подвержены различным видам распада. Склонность к распаду снижает потребительские свойства шлака, распад приводит к разрушению структуры, сопровождается образованием мелкозернистых пылевидных продуктов, которые плохо поддаются переработке и негативно воздействуют на окружающую среду. Для предотвращения распада шлаки выдерживают в складах хранения, а также осуществляют их стабилизацию путем изменения химического состава, структуры или резкого охлаждения шлакового расплава на этапе первичной переработки [1].

Качество и условия поставки шлаковой продукции регламентируются действующими государственными стандартами и техническими условиями, в них отражены основные требования, которые предъявляют потребители, использующие шлаки в своем производстве. Создание новых образцов шлаковой продукции расширяет нормативную базу шлакоперерабатывающего производства.

До 1990-х гг. отечественной переработке шлаков уделялось достойное внимание металлургов, строителей, работников сельского хозяйства и других отраслей. Сегодня на заводы вошли структуры, оснащенные высокопроизводительными агрегаторизованными комплексами (рис. 1). Практически вся вторичная переработка шлаков передана в аутсорсинг [2]. Мощности по вторичной переработке на сегодняшний день превышают выход шлаков от производства черных металлов. Отвалы многих предприятий (НТМК, НЛМК, ММК, ЧМК, ЧерМК и др.) практически полностью переработаны либо перестали пополняться шлаками текущего выхода. Намечился переход заводов на работу без шлаковых отвалов. Нерешенными остались вопросы экологической безопасности процессов вторичной переработки шлаков.



Рис. 1. Сортировочные агрегаты для переработки отвального шлака:

- а* — стационарный, производительностью до 2000 тыс. т в год, фирма «АМКМ», США;
- б* — самоходный, производительностью до 2000 тыс. т в год, английская фирма EXTEC;
- в* — самоходный, производительностью до 1000 тыс. т в год, североирландская компания «Пауэр Пак Минералз»

В последние годы снизилось внимание предприятий к переработке шлаков в жидком виде: ограничено производство граншлака, практически не производится шлаковая пемза, шлаковата, шлаковое литье, прекратились работы по корректировке составов шлакового расплава. Мелкозернистые высокоосновные шлаки перестали применять для удобрения и мелиорации почв.

Разработки отечественных специалистов в области шлакопереработки к 1990-м гг. достигли мирового уровня. В этот период Уральским институтом металлов, головным по переработке и использованию шлаков черной металлургии, были созданы и внедрены технологии, обеспечивающие повышение производительности процессов шлакопереработки, защиту окружающей среды, расширение ассортимента и улучшения качества шлаковой продукции [1]. К ним можно отнести технологии термодробления и двухстадийной переработки сталеплавильных шлаков, позволяющие сократить продолжительность охлаждения жидких шлаков, ускорить процессы гидратации свободной извести и использовать сталеплавильные шлаки в строительстве автодорог без длительного вылеживания [3]. Широкое распространение получили разработки специалистов ВНИИМТа по припечной грануляции доменных шлаков [4]. Технология внедрена на металлургических заводах России, Украины, Индии и Китая [5]. Разработаны теоретические основы технологии сухой грануляции сталеплавильных шлаков на разгонных лотках с вентиляторным и компрессорным дутьем [6]. Технология создает условия для получения граншлака и утилизации тепла расплава. Технический проект установки воздушной грануляции шлака с утилизацией тепла был выполнен Сибгипрометом для Кузнецкого металлургического комбината. Расчетная степень утилизации тепла 52 %. [7]. Практическая реализация этих разработок осуществлена на сталелитейном заводе в Южной Корее [8]. Исследованы теплофизические свойства доменных шлаков и разработаны основы производства литых изделий (тюбингов для метростроя, железнодорожных шпал, пригрузов для трубопроводного транспорта, строительных изделий и т. п.).

На заводах России и Казахстана внедрены установки пневмокласификации и рентгенометрической сепарации для извлечения немагнитных металлических включений

из шлаков различных производств [9]. Выполнен комплекс исследований по использованию металлургических шлаков для мелиорации и удобрения почв. Совместно с Уральским институтом сельского хозяйства разработана технология получения и применения шлакоизвестковых и шлакофосфорных удобрений из сталеплавильных и ферросплавных шлаков [10; 11]. Внедрены в производство технология и оборудование для получения абразивных материалов из металлургических шлаков для струйной обработки поверхностей [12]. Сегодня они получили широкое распространение для утилизации шлаков медно-никелевого производства. Разработаны и внедрены типовые технологические решения по вторичной переработке металлургических шлаков на дробильно-сортировочных установках производительностью от 50 до 3 000 тыс. т в год [13]. В условиях Нижнетагильского и Новолипецкого комбинатов на лопастном барабане впервые получена гравиеподобная пемза из доменных шлаков [14]. Показатели качества такой шлаковой пемзы в 2–3 раза выше, чем пористого шлакового щебня. Наиболее экономически выгодной является переработка ферросплавных шлаков, в которых содержится высокоценный металл. Разработанная институтом и внедренная на ОАО «Ключевская обогатительная фабрика» технология рентгенорадиометрической сортировки позволяет разделять металл и шлак по видам производств и выделять до 20 и более видов продукции [15]. Заслуживает интерес внедренная на Серовском (СЗФ) и Актюбинском (АЗФ) заводах ферросплавов технология гидроотсадки для извлечения слабомагнитных и немагнитных включений из шлаков ферросплавного производства, повышающая степень извлечения и качество концентрата [16].

Широкие возможности создает новая, разработанная в Уральском институте металлов технология переработки жидких шлаков различных производств в установках барабанного (ротаторного) типа. Технология в опытно-промышленных условиях опробована на шлаках черной и цветной металлургии. Техническая документация для переработки конвертерных шлаков в жидком состоянии в агрегате барабанного типа производительностью до 5 т/мин (рис. 2) была продана металлургическому концерну «Баосталь» (КНР). Технология внедрена на металлургических предприятиях КНР и Юго-Восточной Азии [17–19].

Впервые разработана конструкция малогабаритной установки роторного типа для переработки жидких шлаков производительностью ~1 т/мин с верхней подачей расплава (рис. 3.).



Рис. 2. Подача расплава в установку для переработки конвертерных шлаков в жидком состоянии на комбинате «Баосталь»

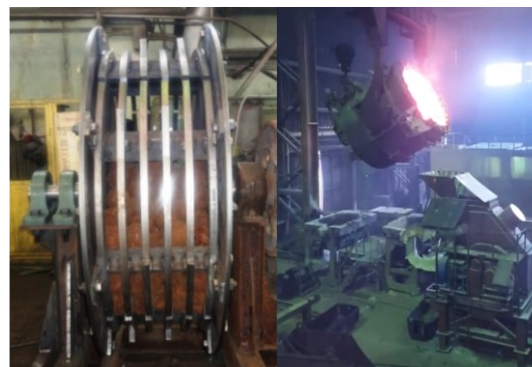


Рис. 3. Конструкция ротора для верхней подачи расплава и подача расплава в опытную установку роторного типа

Установка предназначена для отработки параметров получения различных материалов непосредственно из жидких шлаков (щебня, граншлака, шлаковой пемзы и др.), термической стабилизации распадающихся шлаков и утилизации тепла шлаковых расплавов. Установка опробована на предприятиях черной и цветной металлургии [20–23]. Подобная конструкция установки с верхней подачей расплава разработана в ЦНИИчермете им. И. П. Бардина и испытана на Выксунском металлургическом заводе [24]. В Уральском институте металлов разработан способ утилизации

тепла шлака, когда наибольший энергетический потенциал получают на этапе кристаллизации расплава. Затем отбирается тепло в процессе охлаждения сформированного кускового шлака в температурном интервале 250–450 °С. Это так называемое технологическое тепло можно использовать для подогрева дутья к плавильным агрегатам, подогрева шихты и т. д. На последнем этапе отбирается коммунальное тепло с температурой до 100 °С и выше, которое используют для обогрева помещений и других целей [25]. Расчеты теплового баланса показывают, что одна тонна шлакового расплава с температурой 1 500 °С при остывании выделяет ~1,8 ГДж физического тепла. Нетрудно оценить, что при производстве только чугуна и стали в России со шлаками ежегодно теряется более 50 млн ГДж тепловой энергии, что соответствует сжиганию 1,77 млн т условного топлива. В АО «УИМ» разработана и освоена технология кристаллохимической стабилизации (КХС) самораспадающихся шлаков, позволяющая исключить самопроизвольный распад шлака при охлаждении и получить компактный кусковой материал с устойчивой структурой, более пригодный для переработки (дробления, сортировки, извлечения ценных включений). Материал пригоден для последующего использования взамен извести в металлургии, производстве цементов при получении щебня и щебеночных смесей для стройиндустрии. Впервые технология КХС была внедрена на высокоосновных шлаках рафинированного феррохрома на АЗФ (рис. 4) [26]. В качестве стабилизирующей добавки в состав шлака вводили оксиды бора в виде обожженной боратовой руды Индерского месторождения, позднее — борат кальция.



Рис. 4. Вид распавшегося (а) и стабилизированного (б) шлака рафинированного феррохрома АЗФ

Шлаки внепечного рафинирования стали также подвержены силикатному распаду. Эта особенность не только ухудшает санитарно-гигиенические условия работы в цехах, но и создает сложности при транспортировке и хранении продуктов шлакового распада. Частицы шлака легко аэрируются, распространяются на большие территории, загрязняют атмосферу, почву и грунтовые воды, печные шлаки, вывезенные в отвал. Использование бората кальция для их стабилизации оказалось малоэффективным из-за его дороговизны и физических свойств — он производится в виде мелкозернистого материала крупностью 0–1,0 мм. Чтобы исключить потери стабилизатора при подаче в ковш, его требовалось компактировать. Для стабилизации шлака от установок ковш-печь применяли импортную боратовую руду с содержанием оксида бора до 38 %. Стабилизатор подавали непосредственно в У КП или в шлаковозные чаши при сливе шлака из сталеразливочного ковша после разливки стали. В результате шлак приобретал устойчивую структуру УС1, УС2 по ГОСТ 3344-83 и после охлаждения повторял форму приемной емкости (рис. 5). Его перерабатывали совместно с печным шлаком и отдельно, использовали взамен извести в сталеплавильном производстве и как сырье для производства строительных материалов [27].

Анализ современного состояния шлакопереработки показывает, что мощности дробильно-сортировочных установок превышают выход шлаков текущего производства и приводят к уменьшению отвалов. Современные требования экономики и охраны окружающей среды требуют создания и внедрения технологий и оборудования по переработке шлаков в жидком

виде, улучшения качества продукции на этапе первичной переработки. Переработка шлака в жидком виде позволит организовать технологический процесс в высокоэкономичных, экологически безопасных малогабаритных агрегатах, корректировать состав и свойства шлаков, расширить номенклатуру и качество получаемой продукции, создать условия для утилизации тепла расплава и рециклинга продуктов шлакопереработки.



Рис. 5. Вид распадающегося (а) и стабилизированного (б) шлака от установок ковш-печь

Таким образом, к настоящему времени разработаны основные технологические решения по массовой переработке шлаков, что позволяет ставить задачу по полному переводу предприятий черной металлургии на работу без шлаковых отвалов. Наиболее перспективным направлением для ее решения является переработка шлаков в жидком состоянии путем внедрения следующих технологических процессов: переработки шлаковых расплавов в агрегатах барабанного (роторного) типа, сухой грануляции, утилизации тепла шлаков, жидкофазного восстановления металлов, корректировки свойств шлаковых расплавов, стабилизации структуры распадающихся шлаков, сокращения вредных выбросов и др.

Эти процессы обеспечивают снижение экологической нагрузки на окружающую среду, сокращение материальных, энергетических и эксплуатационных затрат, расширение номенклатуры и качества получаемой продукции.

Список источников

1. Смирнов Л. А., Сорокин Ю. В., Снитяновская Н. М. и др. Переработка техногенных отходов. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. 607 с.
2. Демин Б. Л., Сорокин Ю. В., Смирнов Л. А., Щербаков Е. Н. Вторичная переработка металлургических шлаков // Труды Конгресса с международным участием и конференции молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» ТЕХНОГЕН 2019. С. 117–123.
3. Борисов Ю. Н., Панфилов М. И., Коваленко В. Г. и др. Новая технология переработки конвертерных шлаков на ЗСМК // Шлаки черной металлургии. Труды УралНИИЧМ. Т. 29. Свердловск, 1977. С. 107–111.
4. Шаранов М. А., Зайнуллин Л. А., Захарченко Г. Я. Придоменная грануляция шлака и чугуна // Сталь. 1980. № 3. С. 178–180.
5. http://www.vniimt.ru/rus/print.php?p=info_additional&id=26 (дата обращения: 10.12.2019).
6. Агафонов С. А., Путинцев В. А., Стратонович В. Н. Отработка параметров процесса сухой грануляции шлаков низконапорным воздушным потоком // Комплексная переработка шлаков металлургического производства. Свердловск: УралНИИЧМ, 1982. С. 104–110.
7. Смирнов Л. А., Сорокин Ю. В., Демин Б. Л., Мясник А. А. Технологические приемы переработки шлаков в жидком состоянии // Бюллетень «Черная металлургия». 2008. № 7.
8. www.metalinfo.ru (дата обращения: 09.11.2019).
9. Грабеклис А. А., Кожевникова В. А., Долганов Е. А. Эффективность применения пневмокласификации для переработки шлаков от производства марганцевых сплавов // Шлаки черной металлургии. Труды УралНИИЧМ. Т. 32. Свердловск, 1978. С. 107–110.

10. Васильева С. Н., Менаджиева Р. А., Широков А. Ф. и др. Эффективность известкования кислых почв Тюменской области металлургическими шлаками // Шлаки черной металлургии. Труды УралНИИЧМ. Т. 17. Свердловск. С. 43–47.
11. Путинцев В. А., Сорокин Ю. В., Пахтина Н. И. и др. Технология получения шлакофосфатного удобрения // Шлаки черной металлургии, их переработка и использование: Тематич. отраслевой сб. Свердловск: УралНИИЧермет, 1989. С. 87–91.
12. Демин Б. Л., Сорокин Ю. В., Кулезнева Л. П. Технологические особенности производства абразивных материалов из металлургических шлаков // Шлаки черной металлургии, их переработка и использование: Тематический отраслевой сб. Свердловск: УралНИИЧМ, 1989. С. 25–29.
13. Демин Б. Л., Щербаков И. И. Типовые технологические решения по переработке твердых металлургических шлаков // Шлаки черной металлургии, их переработка и использование: Тематический отраслевой сб. Свердловск: УралНИЧМ, 1989. С. 5–14.
14. Школьник Я. Ш., Дерябин А. А., Орнинский Н. В. и др. Освоение технологии производства шлакопемзового гравия // Шлаки черной металлургии, их переработка и использование. Свердловск, 1990. С. 23–28.
15. Сорокин Ю. В., Демин Б. Л., Рытвин В. М. Переработка шлаков алюмотермического производства ферросплавов // Расплавы. 2011. № 3. С. 68–73.
16. Фадеев В. И., Островский Я. И., Веселовский И. А. и др. Переработка хромистых шлаков в условиях ОАО «СЗФ» // Труды Всероссийской конференции с элементами школы молодых ученых «Исследования в области переработки и утилизации техногенных образований и отходов». Екатеринбург, 2009. С. 224–228.
17. Патент RU № 2044712. Установка для переработки металлургических шлаков / Школьник Я. Ш., Демин Б. Л., Сорокин Ю. В. и др. № 5063407/33; заявл. 25.09.1992, опубл. 27.09.95.
18. Патент RU № 2388709. Установка для переработки шлакового расплава и способ переработки шлакового расплава в этой установке // Смирнов Л. А., Демин Б. Л., Сорокин Ю. В. и др. № 2009104883/03; заявл. 12.02.2009; опубл. 10.05.2010.
19. Цао Джидун, Се Лянде. Установка для обработки жидкого сталеплавильного шлака методом применения роторного цилиндра на «Баостил» и их производственные результаты // BaostilOrg. 2001.
20. Сорокин Ю. В., Демин Б. Л., Смирнов Л. А., Иванова С. И., Гуленков В. Ю., Волошин Ю. А. Переработка шлаков ЭСПЦ в опытной установке барабанного типа с шаровой насадкой // Сталь. 2012. № 3. С. 70–73.
21. Смирнов Л. А., Леонтьев Л. И., Сорокин Ю. В. Переработка и использование техногенных отходов металлургического производства // Труды Международного конгресса «Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов». Техноген — 2012. Екатеринбург, 2012. С. 15–20.
22. Демин Б. Л., Сорокин Ю. В., Щербаков Е. Н. и др. Перспективы применения установок барабанного типа для переработки металлургических шлаков // Металлург. 2015. № 11. С. 31–33.
23. Патент RU № 2513384. Установка для переработки шлака с утилизацией тепла / Демин Б. Л., Сорокин Ю. В., Смирнов Л. А., Щербаков Е. Н. № 2012144468/03; заявл. 18.10.2012; опубл. 20.04.2014, Бюл. № 11.
24. Шакуров А. Г., Школьник Я. Ш., Журавлев В. В. и др. Результаты разработки технологии и оборудования для переработки и стабилизации шлакового расплава в товарный продукт // Черная металлургия. 2014. № 2 (1370). С. 82–86.
25. Сорокин Ю. В., Демин Б. Л., Смирнов Л. А., Щербаков Е. Н. Возможность утилизации физического тепла шлака на установках барабанного типа // Труды Конгресса с международным участием и конференции молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований». ТЕХНОГЕН 2019. С. 41–45.
26. Грабеклис А. А., Демин Б. Л., Кайракбаев С. Н. и др. Новое в технологии кристаллохимической стабилизации шлаков производства рафинированного феррохрома // Сталь. 2010. № 5. С. 78–83.
27. Сорокин Ю. В., Демин Б. Л., Чижикова В. М., Ролдугин И. А., Лавров А. С. Стабилизация самораспадающихся шлаков // Сталь. 2015. № 11. С. 52–56.

References

1. Smirnov L. A., Sorokin Yu. V., Snityanovskaya N. M., Danilov N. I., Eremin A. Yu. *Pererabotka tekhnogennykh othodov* [Processing of industrial waste]. Ekaterinburg, ООО “Availabe at”, 2012, 607 p. (In Russ.).
2. Demin B. L., Sorokin Yu. V., Smirnov L. A., Shcherbakov E. N. *Vtorichnaya pererabotka metallurgicheskikh shlakov* [Recycling of metallurgical slags]. *Trudy kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i konferencii molodykh uchenykh “Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki processov pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy” TEHNOGEN 2019* [Proceedings of the Congress of the International Participation Congress and Conference of Young Scientists "Fundamental Research and Applied Development of Processes for the Processing and Utilization of Man-Made Formations" TEHNOGEN 2019], pp. 117–123. (In Russ.).

3. Borisov Yu. N., Panfilov M. I., Kovalenko V. G., Sorokin Yu. V. Novaya tekhnologiya pererabotki konvertornykh shlakov na ZSMK [New technology for processing converter slag at ZSMK]. *Shlaki chernoj metallurgii, Trudy UralNIChM*, vol. 29. Sverdlovsk, 1977, pp. 107–111. (In Russ.).
4. Sharanov M. A., Zajnullin L. A., Zaharchenko G. Ya. Pridomennaya granulyatsiya shlaka i chuguna [Blast furnace granulation of slag and pig iron]. *Stal'*, 1980, no. 3, pp. 178–180. (In Russ.).
5. http://www.vniimt.ru/rus/print.php?p=info_additional&id=26 (accessed 10.12.2019).
6. Agafonov S. A., Putincev V. A., Stratonovich V. N. Otrabotka parametrov processa suhoj granulyacii shlakov nizkonapornym vozdushnym potokom [Development of parameters for the dry granulation of slag using a low-pressure air flow]. *Kompleksnaya pererabotka shlakov metallurgicheskogo proizvodstva*. Sverdlovsk, UralNIChM, 1982, pp. 104–110. (In Russ.).
7. Smirnov L. A., Sorokin Yu. V., Demin B. L., Myasnik A. A. Tekhnologicheskie priemy pererabotki shlakov v zhidkom sostoyanii [Technological methods of processing slag in a liquid state]. *Byulleten' "Chernaya metallurgiya"*, 2008, no. 7. (In Russ.).
8. <http://www.metalinfo.ru> (accessed 09.11.2019).
9. Grabeklis A. A., Kozhevnikova V. A., Dolganov E. A. Effektivnost' primeneniya pnevmoklassifikacii dlya pererabotki shlakov ot proizvodstva margancevykh splavov [The effectiveness of using pneumatic classification for processing slag from the production of manganese alloys]. *Shlaki chernoj metallurgii, Trudy UralNIChM*, vol. 32. Sverdlovsk, 1978, pp. 107–110. (In Russ.).
10. Vasil'eva S. N., Menadzhieva R. A., Shirokov A. F. et al. Effektivnost' izvestkovaniya kisl'nykh pochv Tyumenskoj oblasti metallurgicheskimi shlakami [The effectiveness of liming acidic soils in the Tyumen region with metallurgical slag]. *Shlaki chernoj metallurgii, Trudy UralNIChM*, vol. 17. Sverdlovsk, pp. 43–47. (In Russ.).
11. Putincev V. A., Sorokin Yu. V., Pahtina N. I. et al. Tekhnologiya polucheniya shlakofosfatnogo udobreniya [Technology for producing slag-phosphate fertilizer]. *Shlaki chernoj metallurgii, ih pererabotka i ispol'zovanie*. Sverdlovsk, UralNIChM, 1989, pp. 87–91. (In Russ.).
12. Demin B. L., Sorokin Yu. V., Kulezneva L. P. Tekhnologicheskie osobennosti proizvodstva abrazivnykh materialov iz metallurgicheskikh shlakov [Technological features of the production of abrasive materials from metallurgical slags]. *Shlaki chernoj metallurgii, ih pererabotka i ispol'zovanie*. Sverdlovsk, UralNIChM, 1989, pp. 25–29. (In Russ.).
13. Demin B. L., Shcherbakov I. I. Tipovye tekhnologicheskie resheniya po pererabotke tverdykh metallurgicheskikh shlakov [Typical technological solutions for processing solid metallurgical slag]. *Shlaki chernoj metallurgii, ih pererabotka i ispol'zovanie*. Sverdlovsk, UralNIChM, 1989, pp. 5–14. (In Russ.).
14. Shkol'nik Ya. Sh., Deryabin A. A., Orininskij N. V., Agafonov S. A. Osvoenie tekhnologii proizvodstva shlakopemzovogo graviya [Mastering the technology of slag-pebble gravel production]. *Shlaki chernoj metallurgii, ih pererabotka i ispol'zovanie*. Sverdlovsk, 1990, pp. 23–28. (In Russ.).
15. Sorokin Yu. V., Demin B. L., Rytvin V. M. Pererabotka shlakov alyumotermicheskogo proizvodstva ferrosplavov [Recycling of slags from aluminum-thermal production of ferroalloys]. *Rasplavy*, 2011, no. 3, pp. 68–73. (In Russ.).
16. Fadeev V. I., Ostrovskij Ya. I., Veselovskij I. A. et al. Pererabotka hromistyykh shlakov v usloviyakh OAO "SZF". [Processing of chromium slags at OAO SZFM]. *Trudy Vserossiyskoj konferencii s elementami shkoly molodykh uchennykh "Issledovaniya v oblasti pererabotki i utilizacii tekhnogennykh obrazovaniy i othodov"*. Ekaterinburg, 2009, pp. 224–228. (In Russ.).
17. Patent RU № 2044712 Ustanovka dlya pererabotki metallurgicheskikh shlakov. [A slag melt processing unit and a method for processing slag melt in this unit]. Shkol'nik Ya. Sh., Demin B. L., Sorokin Yu. V. et al.; Zayavka 5063407/33, 25.09.1992, Publ. 27.09.1995. (In Russ.).
18. Patent RU № 2388709 Ustanovka dlya pererabotki shlakovogo rasplava i sposob pererabotki shlakovogo rasplava v etoj ustanovke [A slag melt processing unit and a method for processing slag melt in this unit]. Smirnov L. A., Demin B. L., Sorokin Yu. V. et al. Zayavka 2009104883/03, 12.02.2009. Opubl. 10.05.2010. (In Russ.).
19. CaoDzhidun, Se Lyande. Ustanovka dlya obrabotki zhidkogo staleplavil'nogo shlaka metodom primeneniya rotornogo cilindra na "Baostil" i ih proizvodstvennye rezul'taty [Installation for processing liquid steelmaking slag using a rotary cylinder at Baosteel and their production results]. BaostilOrg/ 2001. (In Russ.).
20. Sorokin Yu. V., Demin B. L., Smirnov L. A., Ivanica S. I., Gunenkov V. Yu., Voloshin Yu. A. Pererabotka shlakov ESPC v opytnej ustanovke barabannogo tipa s sharovoj nasadkoj [Processing of ESPC slag in a pilot drum-type installation with a ball nozzle]. *Stal'*, 2012, no. 3, pp. 70–73. (In Russ.).
21. Smirnov L. A., Leont'ev L. I., Sorokin Yu. V. Pererabotka i ispol'zovanie tekhnogennykh othodov metallurgicheskogo proizvodstva [Recycling and use of technogenic waste from metallurgical production]. *Trudy mezhdunarodnogo kongressa "Fundamental'nye osnovy tekhnologij pererabotki i utilizacii tekhnogennykh othodov" Tekhnogen—2012*. Ekaterinburg, 2012, pp. 15–20. (In Russ.).

22. Demin B. L., Sorokin Yu. V., Shcherbakov E. N. et al. Perspektivy primeneniya ustanovok barabannogo tipa dlya pererabotki metallurgicheskikh shlakov [Prospects for using drum-type installations for processing metallurgical slag]. *Metallurg*, 2015, no. 11, pp. 31–33. (In Russ.).
23. Patent RU № 2513384 Ustanovka dlya pererabotki shlaka s utilizaciej tepla. [Slag recycling plant with heat recovery]. Demin B. L., Sorokin Yu. V., Smirnov L. A., Shcherbakov E. N. Zayavka 2012144468/03 ot 18.10. 2012, Publ. 20.04.2014, Byul. No. 11. (In Russ.).
24. Shakurov A. G., Shkol'nik Ya. Sh., Zhuravlev V. V. et al. Rezul'taty razrabotki tekhnologii i oborudovaniya dlya pererabotki i stabilizatsii shlakovogo rasplava v tovarnyj product [Results of the development of technology and equipment for processing and stabilizing slag melt into a marketable product]. *Chernaya metallurgiya*, 2014, no. 2 (1370), pp. 82–86. (In Russ.).
25. Sorokin Yu. V., Demin B. L., Smirnov L. A., Shcherbakov E. N. Vozmozhnost' utilizatsii fizicheskogo tepla shlaka na ustanovkah barabannogo tipa [The possibility of utilizing the physical heat of slag in drum-type plants]. *Trudy kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i konferencii molodyh uchenykh "Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki processov pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy" TEHNOGEN 2019*, pp. 41–45. (In Russ.).
26. Grabeklis A. A., Demin B. L., Kajrakbaev S. N. et al. Novoe v tekhnologii kristallohimicheskoy stabilizatsii shlakov proizvodstva rafinirovannogo ferrokroma [New in the technology of crystallochemical stabilization of slags from the production of refined ferrochrome]. *Stal'*, 2010, no. 5, pp. 78–83. (In Russ.).
27. Sorokin Yu. V., Demin B. L., Chizhikova V. M., Roldugin I. A., Lavrov A. S. Stabilizatsiya samoraspadayushchih-sya shlakov [Stabilization of self-decaying slags]. *Stal'*, 2015, no. 11, pp. 52–56. (In Russ.).

Информация об авторах

Л. А. Смирнов — академик РАН, научный руководитель института;

Б. Л. Демин — кандидат технических наук, исполнительный директор НИЦ.

Information about the authors

L. A. Smirnov — Academician of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director of the Institute;

B. L. Demin — PhD (Engineering), Executive Director of the Research Center.

Статья поступила в редакцию 02.06.2025; одобрена после рецензирования 23.06.2025; принята к публикации 07.07.2025.
The article was submitted 02.06.2025; approved after reviewing 23.06.2025; accepted for publication 07.07.2025.