



Обзорная статья

УДК 669.48:669.53

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-643-680>

Обзор методов переработки пылей электродуговой плавки

Юлия Игоревна Топоркова¹, Дана Блудова^{2✉},
Сергей Владимирович Мамяченков³, Ольга Сергеевна Анисимова⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,

г. Екатеринбург, Россия

¹ yulia.toporkova@gmail.com

² bludova.finans@gmail.com

³ s.v.mamiachenkov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6070-8746>

⁴ osanis@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1649-1177>

Аннотация. Цель – провести аналитический обзор способов переработки техногенного отхода черной металлургии – пыли электродуговой плавки – с определением ежегодных объемов выбросов данной пыли и конкретизацией источника каждого отдельного компонента пыли. Сравнительный анализ проводился на основе обзора научных публикаций, посвященных вопросу переработки пыли электродуговой плавки, за последние 20 лет. Рассмотрены основные способы переработки пыли для извлечения железа, цинка и других металлов с применением действующих технологий: пиро-, гидрометаллургических и их комбинаций. Показано, что на сегодняшний день разработано достаточно много различных высокотемпературных технологий, позволяющих эффективно перерабатывать цинкостержащие пыли (в частности, вельц-процесс и его производные). Однако многие из этих технологий остались на стадии разработки в силу различных причин (требуют огромных капитальных вложений, ненадежны, энергос затратны и имеют невысокую производительность). Показано, что гидрометаллургические процессы являются безопасными в экологическом плане, обеспечивают селективность по извлечению ценных компонентов и возможность регулирования технологических параметров. Подбирая растворитель (кислотный или щелочной), можно селективно извлекать необходимый металл из пыли, и данная технология будет рентабельна даже с низким содержанием ценного компонента. Описаны способы обработки изучаемой металлургической пыли неорганическими, органическими кислотами и растворами на основе аммиака. Рассмотрены как традиционные решения по переработке пыли электродуговой плавки в промышленных масштабах, так и последние лабораторные разработки, с недавнего времени внедренные на заводах по производству цинка (их особенности, преимущества и недостатки). Названы технологии, позволяющие извлечь ценные компоненты из пыли и вернуть их в производственный цикл.

Ключевые слова: черная металлургия, пыль электродуговой плавки, гидрометаллургическая переработка, гидрометаллургические способы переработки

Для цитирования: Топоркова Ю. И., Блудова Д., Мамяченков С. В., Анисимова О. С. Обзор методов переработки пылей электродуговой плавки // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 643–680. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-643-680>.

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

Review article

A review of processing methods for electric arc furnace dust

Yulia I. Toporkova¹, Dana Bludova^{2✉}, Sergey V. Mamyachenkov³, Olga S. Anisimova⁴

Ural Federal University named after the first President of Russia Boris N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ yulia.toporkova@gmail.com

² bludova.finans@gmail.com

³ s.v.mamiachenkov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6070-8746>

⁴ osanis@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1649-1177>

Abstract. The work presents an analytical review of processing methods for industrial waste from the ferrous industry, namely, electric arc furnace dust. The annual emissions of this dust and the source of each dust component are determined. Scientific works on the topic of processing electric arc furnace dust published over the past 20 years are compared and analysed. The major methods for dust processing to recover iron, zinc and other metals include pyro- and hydrometallurgical techniques and their combinations. To date, several high-temperature technologies have been developed that allow zinc-containing dust to be efficiently processed (in particular, the Waelz process and secondary processes). However, many of these technologies have remained at the development stage for various reasons (either requiring considerable capital investments, or being unreliable, energy-intensive and inefficient). It is shown that hydrometallurgical processes are environmentally safe and selective to valuable components and allow technological parameters to be controlled. By selecting a suitable solvent (acidic or alkaline), the required metal can be selectively extracted from dust. In addition, such a technology will be cost-effective even under low contents of the extracted component. Approaches to processing metallurgical dust with inorganic and organic acids and ammonia-based solutions are described. Both conventional processing of electric arc furnace dust on an industrial scale and the laboratory developments recently introduced at zinc production plants (their features, advantages and disadvantages) are discussed. Technologies that allow valuable components in the dust to be extracted and returned to the production cycle are identified.

Keywords: ferrous metallurgy, dust of electric arc melting, pyrometallurgical processing, hydrometallurgical processing methods

For citation: Toporkova Yu. I., Bludova D., Mamyachenkov S. V., Anisimova O. S. Review of electric arc melting dust processing methods. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):643-680. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-643-680>.

ВВЕДЕНИЕ

Неуклонный рост потребления цинка и длительное развитие мирового горно-металлургического комплекса на основе модели экстенсивного недропользования неизбежно способствовало истощению запасов разрабатываемых богатых месторождений и образованию значительных объемов техногенных отходов.

Россия является традиционным производителем цинка (250 тыс. т/год рафинированного металла), однако рост его производства ограничен низким качеством отечественных колчеданно-полиметаллических руд. Поэтому перспективные задачи по вводу новых мощностей и модернизации технологических процессов должны обеспечиваться расширением и реструктуризацией минерально-сырьевой базы цинка, в том числе за счет вовлечения в переработку цинкосодержащего техногенного сырья.

Процессы черной металлургии характеризуются формированием большого количества отходов. В среднем на 1 т выплавленной стали в печах переменного тока образуется около 25–30 кг пыли; учитывая высокую производительность сталепромышленных заводов, мировые запасы пыли составляют порядка 5,6 млрд т. В Российской Федерации – 0,7 млн т пыли образуется ежегодно, при ее складиро-

вании наносится вред окружающей среде и теряется до, соответственно, тыс. т/год: 800 железа, 500 цинка и 150 свинца. Такое количество ценного сырья может частично покрывать потребность в сырье предприятий черной и цветной металлургии [1].

Состав пылей сталеплавильной промышленности отличается в зависимости от применяемой технологии, в ходе которой она образуется, и от состава исходного сырья. Диапазон содержания цинка в пылях достаточно широк, колеблется от 2 до 25%, в некоторых случаях содержание по цинку достигает 40% [2]. Цветные металлы и сплавы из вторичного сырья играют важную роль в общем балансе производства и потребления цветных металлов в нашей стране: их доля по отношению к общему объему производства составляет около 25%.

По данным «International lead and zinc study group»⁵ мировое производство и потребление цинка и свинца ежегодно растет, и добыча цинковых руд не успевает обеспечить необходимую в них потребность. Во многих странах проводятся исследовательские работы по поиску наилучших технологий переработки вторичных ресурсов. Задача усложняется переменным составом и металлургическими свойствами пыли. Каждому металлургическому предприятию приходится

⁵ International Lead and Zinc Study Group [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ilzsg.org/static/backgroundinfo.aspx?from=1> (18.03.2021).

разрабатывать технологии согласно характеристикам образующихся отходов.

В настоящее время извлечение цинка из отходов сталеплавильного производства осуществляется в незначительном масштабе и преимущественно пирометаллургическими методами, характеризующимися высоким расходом восстановителя, получением низкокачественных товарных продуктов и дополнительным загрязнением окружающей среды. Поэтому вовлечение ценных компонентов металлургической пыли в производство – актуальная задача для индустриально развитых стран мира. Учитывая отмеченное, во всех странах с развитой металлургией непрерывно ведутся работы по возвращению мелких отходов в производство металлургических предприятий. Лидерами здесь являются Япония, США, Германия и Англия. Ведутся работы в Италии, Франции, Испании, Канаде и в последнее время весьма интенсивно в Китае.

Но переработка такого типа отходов требует разработки специальных технологий вследствие содержащихся в пыли вредных примесей, а возвращение ее в производство зачастую невозможно из-за нежелательных компонентов шихты для производства агломерата и чугуна.

По масштабам негативного воздействия на экологию черная металлургия занимает одно из ведущих мест. За время существования металлургических заводов рядом с ними накопилось огромное количество шлакопылевых отвалов. Давно известно, что даже старые, уже выведенные из эксплуатации, отвалы плохо влияют на атмосферу, гидросферу и почвенный покров окружающей местности, а через них – на состояние флоры, фауны и здоровье людей. Поэтому ликвидация шлакопылевых отвалов сегодня стала одной из самых насущных задач охраны окружающей среды. Извлечение цинка и железа из сталеплавильной пыли позволит не только сэкономить энергию, необходимую для производства этих металлов из их руд, но и сохранить природные ресурсы.

В Федеральном классификационном каталоге отходов (ФККО) (каталог отходов, образующихся на территории Российской Фе-

дерации) приведены агрегатное состояние отхода или его физическая форма, опасные свойства или их комбинация и класс опасности отхода. В ФККО также входят отходы металлургического производства, в том числе пыль. Уловленная пыль, образующаяся при производстве чугуна и стали, имеет IV класс опасности. Анализ состава и свойств сталеплавильной пыли является одной из главных задач для определения ее воздействия на окружающую среду и организм человека.

Захоронение пыли сталеплавильных цехов по ряду причин является бесперспективным. Во-первых, из всех мелких отходов металлургического производства сталеплавильные пыли представляют наибольшую угрозу окружающей среде. Это связано с их мелкодисперсным характером – до 80% частиц размером менее одного микрона. Они легко выносятся в атмосферу и вымываются водой, загрязняя почву. К тому же пыль и шламы газоочисток сталеплавильных цехов содержат многократно превышающую предельно допустимую концентрацию, чрезвычайно токсичные и хорошо растворимые в воде цианиды (соли синильной кислоты), радониды и другие вредные для человека соединения и элементы, такие как Pb, Cd, As, F и Cr (IV). Поэтому захоронение требует специальной, дорогостоящей дезактивации этих отходов. Затраты на это, по данным зарубежной практики, составляют более 100 долл/т отходов, а в Японии, учитывая дефицит земли, 200 долл/т отходов. В ряде стран захоронение без дезактивации пыли и шламов металлургических предприятий запрещено законом [3]. Агентством по охране окружающей среды (EPA, США) в 1995 г. пыль электросталеплавильных цехов была отнесена к опасным отходам класса K061, требующим специальной обезвреживающей обработки.

Различным аспектам металлургической переработки цинксодержащего первичного и вторичного сырья посвящены исследования известных отечественных и зарубежных ученых, среди которых следует выделить работы С. С. Набойченко, Я. М. Шнеерсона, П. А. Козлова, А. А. Перетрутова, А. Стефанова, Дж. Дж. Аромаа, П. Аустодаки, М. А. Пашке-

вич, однако значительный круг вопросов, связанный с проблемами извлечения цинка из разнотипных сырьевых материалов с высоким содержанием его ферритных форм, остается недостаточно изученным.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Значимое содержание ценных компонентов, особенно цинка и железа, в пыли электродуговой плавки (ЭДП) делает ее ценным, и в то же время сложным для переработки сырьем. Целью настоящего обзора был анализ имеющихся отечественных и зарубежных источников, описывающих переработку пыли электродуговой плавки и результаты, полученные в ходе исследований, как относительно извлечения цинка, так и примеры успешно внедренных технологий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика пыли электродуговой плавки как вторичного сырья. Дуговая сталеплавильная печь (ДСП), как и любой металлургический агрегат, является источником пылегазовых выбросов. Несмотря на общие закономерности образования пыли при производстве стали в разных агрегатах, формирование пыли в ДСП имеет свои особенности. Максимальных значений выбросы достигают в периоды воздействия электрических дуг на ванну и продувки ванны кислородом. Небольшое количество пыли образуется в период расплавления чистой и крупногабаритной шихты. Минимальные значения достигаются в период доводки [4].

При воздействии электрических дуг на ванну за счет высокой концентрации энергии происходит местный перегрев металла до температуры 3000–3500°C. Основными процессами пылеобразования при этом являются интенсивное испарение железа и других элементов, а также электрическая эрозия поверхности шихты (металла).

Кроме того, за счет электро- и газодинамических сил в зонах дугового разряда происходит разбрызгивание металла, дробление образовавшихся капель и местный перегрев металла, интенсивное окисление и испарение компонентов шихты [5]. Интенсивность,

состав и свойства пылегазовых выбросов зависят от вместимости и других конструктивных параметров печей, особенностей энерготехнологических режимов их работы, выбора пылеулавливающих аппаратов.

Пыль ЭДП содержит железо, цинк, кадмий, свинец, хлор, щелочные и щелочноземельные металлы. Наличие в расплаве некоторых цветных металлов объясняется тем, что большинство современных конструкционных и специализированных сталей являются легированными или подвергаются цинкованию для защиты металлоизделий от коррозии. Из всего объема загружаемого материала в печь ДСП в пыль переходят практически на 100% цинк, около 10% всего марганца, 40% свинца. Химический состав пыли зависит от перерабатываемого стального лома, типа производимой стали и технологических параметров плавки.

Увеличение использования оцинкованной стали при производстве автомобильных кузовов и обшивок привело к увеличению содержания цинка в пыли с течением времени. Выбросы в ЭДП пропорциональны производству стали, таким образом, увеличение производства стали увеличивает количество пыли ЭДП. Примерно 1–2 масс.% лома, загружаемого в плавильные печи, превращается в пыль, это означает, что ежегодно во всем мире образуется до 5–7 млн т пыли.

Точная характеристика материала определяет перспективные пути его переработки. Необходимо знать не только химический состав пыли, также требуется выяснить ее минералогический состав. Неоднородность вторичного сырья – основная трудность при поиске «универсальной» технологии переработки пыли ЭДП. Каждая технология, внедряемая на производстве, должна быть адаптирована к химическому и минералогическому составу конкретной сталеплавильной пыли [6–8].

Считается, что пыль электросталеплавильного производства на 90% состоит из оксидов, остальные 10% представлены ферритами, сульфатами, сульфидами, хлоридами [6]. Цинк в пыли ЭДП представлен преимущественно в форме оксида (~50%) и франклинита или феррита (~45%) с изо-

морфно замещающими металлами $(Zn_x, Me_y)Fe_2O_4$, где Me – это Mn, Co, Ni, Cr, Ca, остальное – хлорид и сульфат [9]. Мас-совая доля железосодержащих компонентов может достигать 45%, что даже выше, чем у некоторых железных руд. Обнаружено сходство составов пыли ЭДП и никелевой латеритной руды.

Металлы переходят в пыль из разных источников. Например, цинк, образующийся из оцинкованного железного лома, попадает в пыль ЭДП из-за его низкой растворимости в расплавленной стали и шлаке, а также вследствие того факта, что давление паров цинка выше, чем давление паров железа при температурах производства стали [10, 11]. Свинец образуется из краски, присутствующей в кусках лома [11], а марганец, хром и никель [12] находятся в самих стальных сплавах. Хром получается из деталей из легированной стали [13].

Материал представляет собой мелкодисперсный порошок, имеет большой разброс в размерах частиц, поскольку содержит как возгоны цветных металлов и их оксидов, так и крупные частицы, вынесенные потоком газа из печи. Химический состав пыли также колеблется в широких пределах [14]. Пыль электродуговых сталеплавильных печей может иметь окраску от черной до красно-бурой.

С.-З. Рижеску в работе [15] указывает, что мелкие частицы в основном состоят из фаз $ZnFe_2O_4$ и Fe_3O_4 , которые занимают примерно 80–90% от общего количества пыли. Частицы среднего размера приведены оксидами или силикатами металлов. Большие частицы представляют собой силикаты или оксиды железа с частицами оксидов на них.

Важной характеристикой пыли являются горючесть и взрываемость. Способностью к воспламенению обладают пыли металлов, например, Mg, Al и Zn [16]. Пыль электросталеплавильного производства состоит из оксидов металлов, поэтому она не является горючим и воспламеняющимся материалом.

Несмотря на то, что пыли являются богатым сырьем для получения цинка и железа, ежегодно отвалы такой пыли пополняются на десятки тысяч тонн. Именно по этой причине актуальной является разработка рентабельной, эффективной и безопасной технологии, позволяющей переработать промпродукт с последующим возвратом соединений железа в переделы черной металлургии и извлечением цинка, а также других сопутствующих цветных металлов. Предложено достаточно много разнообразных технологий, часть из которых применяется на практике, в основном на зарубежных предприятиях.

ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ПЕРЕРАБОТКИ ПЫЛИ

Переработка пылей ЭДП большей частью представлена пирометаллургическими процессами, которые составляют около 90% всех мощностей переработки данного промпродукта.

Утилизация пыли электросталеплавильного производства в процессе плавки осложнена присутствием цинка в составе пыли, сильно летучего ($p = 0,116$ Па), но трудно восстанавливаемого металла. Цинк восстанавливается в виде паров, которые, поднимаясь с газовым потоком вверх, окисляются и конденсируются на шихте, загружаемой сверху. Таким образом, при прохождении шихты вниз происходит накопление и круговорот металла, увеличивающий расход кокса. Вредное воздействие цинка и его оксидов ускоряет разрушение футеровки из-за образования настывов [17]. Цинк не оказывает негативного влияния на свойства стали в процессе выплавки стали, но при затвердевании его присутствие нежелательно, так как он способствует образованию пузырьков газа и сегрегации на фронте затвердевания [18].

Существуют промышленные, лабораторные и запатентованные технологии металлургической переработки пыли электросталеплавильного производства^{6,7}.

⁶Ванюков А. В., Зайцев В. Я. Теория пирометаллургических процессов: учеб. для вузов: 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1993. 384 с.

⁷Романтеев Ю. П., Федоров А. Н., Быстров В. П. Металлургия цинка и кадмия: учеб. пособ. / под общ. ред. В. П. Быстрова. М.: МИСиС, 2006. 193 с.

ВЕЛЬЦ-ПРОЦЕСС

Наиболее распространенным процессом в промышленности для переработки цинксо-держающих материалов является Вельц-процесс (Waelz process) – процесс переработки во вращающейся трубчатой печи. Около 80% всей перерабатываемой пыли приходится на данный процесс [19].

Согласно авторам [20], Вельц-процесс и связанные с ним технологии прокалки и отмывки вельц-оксидов от фтора и хлора позволяют с большой эффективностью перерабатывать пыли ЭДП с получением высококачественного оксида цинка, именно поэтому сегодня за рубежом методом вельцевания перерабатывают более 80% пылей черной металлургии.

Вельцевание для переработки пылей черной металлургии начали применять еще с середины 70-х годов прошлого столетия в некоторых странах Европы, Японии и США. Способ предназначен для переработки окисленного сырья (также вторичного – кеки нейтрального выщелачивания цинка), все эти материалы схожи по составу и с пылью ЭДП [21].

Один из первых промышленных опытов по переработке шламов и пылей газоочистных установок черной металлургии во вращающихся трубчатых печах был освоен в немецкой компании «AG Krupp» [22].

В таблице представлено содержание основных компонентов в исходном сырье и в полученном после вельцевания продукте [20].

Авторами [23] было изучено распределение цинка, свинца и железа из пыли ЭДП в ходе карботермического восстановления. Процесс изучали в условиях избытка углерода при температурах 1000–1100°C на лабо-

раторной печи Таммана. Пробы отбирали каждые 5–10 мин. После этого анализировали пробы на цинк, свинец. Было показано, что уже за 15 мин обработки цинк удалился на 99%. При температуре 1100°C более чем 75% всего свинца испарилось уже в период нагрева, а за 15 мин выдержки при данной температуре свинец, как и цинк, был удален полностью.

После отгонки ценных компонентов в процессе вельцевания вельц-оксид подвергают прокалке или отмывке с целью удаления фтора и хлора. Получают конечный вельц-оксид с содержанием цинка 55–64%, хлора менее 0,06% и фтора менее 0,01%. После получения целевого вельц-оксида предусматривается получение из клинкера металлизированных окатышей, которые в дальнейшем могут быть возвращены в доменное или электроплавильное производство.

Благодаря тому, что процесс вельцевания обеспечивает высокую производительность с получением сравнительно чистого вельц-оксида, он широко распространен в США, а также в Испании, Франции, Германии, Мексике. В последние годы ведется активная реконструкция действующих вельц-цехов, а также строительство новых на территории России, Казахстана, в развивающихся странах Юго-Восточной Азии и Южной Америки, что приведет к увеличению доли перерабатываемой пыли ЭДП [24].

Согласно работе [25], применение процесса дистилляции пыли ЭДП, пыли медеплавильных производств, изгари в восстановительных условиях во вращающихся трубчатых печах позволило на ПАО «Челябинский цинковый завод» ежегодно производить

Состав пылей электродуговой плавки и продуктов ее переработки вельцеванием (на зарубежных производствах), %
 Composition of electric arc melting dust and the products of its Waelz processing (foreign manufactures), %

Элемент	Пыль электродуговой плавки	Клинкер	Вельц-оксид	Вельц-оксид	
				после отмывки	после прокалки
Zn	12–30	0,2–1,2	55–65	60–68	65–68
Pb	1–3	0,1–0,9	7–12	9–13	нет данных
Cl	4–12	0,1–0,5	4–8	0,05–0,5	<0,06
F	0,5–1,0	0,1–0,2	0,4–0,7	0,06–0,3	<0,02
Fe	24–46	30–50	<1,0	<1	<1
C	–	12–15	0,5–1,0	0,5–1,0	–

более 10 тыс. т цинка в металле и около 4 тыс. т свинца и олова в концентратах.

Таким образом, вельцевание является одним из самых эффективных способов переработки пыли на сегодняшний день, обеспечивает высокие показатели извлечения.

Многие из исследователей работают над способами интенсификации процесса вельцевания. Так, в работе [26] исследовали влияние размера частиц шихты, приготовленной на основе пыли ЭДП и цинковой руды. Установлено, что уменьшение размера частиц шихты до $+0,071-0,04$ мкм снижает степень возгонки цинка, о чем свидетельствует высокое остаточное содержание цинка в огарке, равное 1,02 масс.%. Увеличение крупности частиц шихты до размера $+0,315$ мкм приводит к резкому снижению остаточного содержания цинка в огарке до 0,02 масс.%. Однако при дальнейшем увеличении до размеров частиц около $+1,0$ мкм остаточное содержание цинка в огарке возросло до 0,48 масс.%. Данные исследования показывают, что размер частиц влияет на степень и скорость возгонки цинка при вельцевании. Для применения этих выводов непосредственно в производственной практике необходим контроль за процессами грануляции и брикетирования пыли.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОКУСКОВАНИЯ ДЛЯ ВЕЛЬЦ-ПРОЦЕССА

Эффективность окатывания и брикетирования в восстановительном обжиге изучали во многих работах [27–30].

Например, в патенте [31] предложен способ повышения эффективности восстановления цинка из пылевидных отходов. На первом этапе пыль ЭДП окусковывают совместно с измельченным углеродистым восстановителем, связующим материалом и с известьсодержащим материалом для формирования окатышей или брикетов, причем восстановитель подается в количестве выше стехиометрического в 1,5–2 раза. Затем проводят сушку материала и обжиг во вращающейся печи вместе с кусковым восстановителем крупностью 0–20 мм в количестве 200–500 кг на 1 т пыли ЭДП при температуре выгружаемых материалов 700–1000°C. От-

ходящие газы охлаждают и улавливают пыль, содержащую цинковые и свинцовые возгоны. Согласно представленным результатам, данное изобретение позволит повысить показатели извлечения цинка, а также получить остаточный продукт с показателем металлизации железа около 75%, что удовлетворяет требованиям сталеплавильной печи.

В патенте [32] смесь для вельцевания готовили из пыли ЭДП, гидроксида кальция в количестве 20–30% от содержания кремнезема в шихте, коксовой мелочи с размером частиц менее 1 мм (13–17% от массы всей шихты), затем проводили окомкование шихты с получением гранул размером 2–4 мм и влажностью 10–12%. В результате удалось повысить производительность процесса вельцевания до $1,1 \text{ т/м}^3 \cdot \text{сут}$ и снизить расход коксовой мелочи до 210 кг на 1 т пыли ЭДП.

Во многих работах представлены результаты исследования по выбору эффективного восстановителя и связующего вещества для формирования брикетов или окатышей. Так, в работе [26] исследовали три вида связующих веществ – бентонит (глина, состоящая из слоистых алюмосиликатов с высокой способностью к поглощению воды), гашеная известь и патока (отход сахарно-свекольного производства). Установили, что оптимальным связующим является патока в количестве 4,5–5% от массы руды.

В работе [33] также широко изучали различные виды связующих при агломерации. При использовании патоки достигается самая высокая степень возгонки цинка. Был предложен эффективный тип восстановителя – спецкокс, получаемый путем термоокислительного коксования угля (в данной работе – Шубаркольского месторождения).

Согласно представленным в работе [34] данным, спецкокс имеет реакционную способность – $5,2 \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{с}$, тогда как металлургический кокс только $0,62 \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{с}$. Для повышения экономичности производств в работе предложено применять для производства коксового восстановителя более дешевые и доступные виды углей – бурые, длиннопламенные, газовые, петрографически однородные и другие взамен каменных углей, это по-

может снизить себестоимость производимого кокса.

В технологической схеме, разработанной в АО «Уральский институт металлов» [35], пыль подвергают обезвоживанию до показателей влажности на уровне 6–8% сперва в радиальных отстойниках, затем на пресс-фильтрах, и в конце проводят сушку в сушильных барабанах. Высушенную пыль смешивают с коксовой мелочью и брикетируют, а полученные брикеты подвергают обжигу во вращающейся печи. В процессе получают возгоны с содержанием цинка 20–50% и металлized сырье с содержанием железа 55–60%.

Схожий процесс был предложен в Украинском научно-техническом центре металлургической промышленности «Энергосталь» [36], только процесс брикетирования был заменен на окатывание в тарельчатом грануляторе и вместо твердого углеродистого восстановителя (кокса и угля) применяли отходы производства нефтепродуктов.

В работе [37] также изучали способы снижения стоимости восстановительных процессов путем замены дорогостоящего кокса на более дешевые и не менее эффективные углеродистые восстановители. Один из предложенных – карбонизат рексил (получаемый методом высокоскоростной термоокислительной карбонизации угля).

Существуют разработки, направленные на снижение стоимости процесса вельцевания, а также повышение его эффективности и производительности. Хотя доля вельцевания в общем объеме перерабатываемой пыли ЭДП на сегодняшний день по-прежнему высока, эти внедрения могут увеличить рентабельность переработки залежей цинксо-держащей пыли.

По мнению многих исследователей, процесс вельцевания, имеющий уже более чем вековую историю, постоянно укрепляет свои позиции, в том числе и в переработке вторичного сырья, а также совершенствуется и представляет собой перспективный способ

переработки пыли ЭДП⁸ [38, 39].

РЕЦИКЛИНГ В СТАЛЕПЛАВИЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Несмотря на вышесказанное, во многих публикациях отмечается перспективность возврата пыли ЭДП в оборот сталелитейных переделов.

Согласно исследованиям, проведенным специалистами фирмы «ESM» (США) рециклинг пыли ЭДП в собственное производство имеет ряд достоинств [40]:

- извлечение железа из пыли напрямую без проведения предварительного обесцинкования;
- увеличение выхода стали на плавке;
- обогащение вторичной пыли цветными металлами (цинк, свинец, кадмий);
- снижаются общие затраты на переработку пыли.

Авторами [41] изучалась возможность рециклинга пыли в дуговых сталеплавильных печах, который можно осуществлять двумя способами: с предварительным брикетированием и вдуванием. Согласно представленным в статье данным, при условии, если на Белорусском металлургическом заводе в плавку добавлять по 1–2 т пыли, то возможно утилизировать всю образующуюся пыль, при этом цинк будет снова возгоняться и улавливаться в газоочистных системах. Многократный рециклинг пыли в процессе способствует повышению содержания цинка и свинца в пыли с 20% до 30–35%, а в бедных по цинку пылях – с 5–6% до 30%. На рис. 1 представлено изменение содержания цинка и свинца в пыли после рециклинга для пылей с различным содержанием цинка [42].

Подобные исследования рециклинга пыли в ЭДП путем инъекции проводили на печах компании «Krupp Edelstahlprofile» (КЕР, Германия), а также в процессах «Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken» (Германия), «Det Danske Stalvalsev» (DDS, Дания) и «Carbofer» в Англии [43]. Пыль и уголь направляли в смеситель, а затем пневматической

⁸Худяков И. Ф., Дорошкевич А. П., Карелов С. В. Металлургия вторичных тяжелых металлов: учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1987. 523 с.

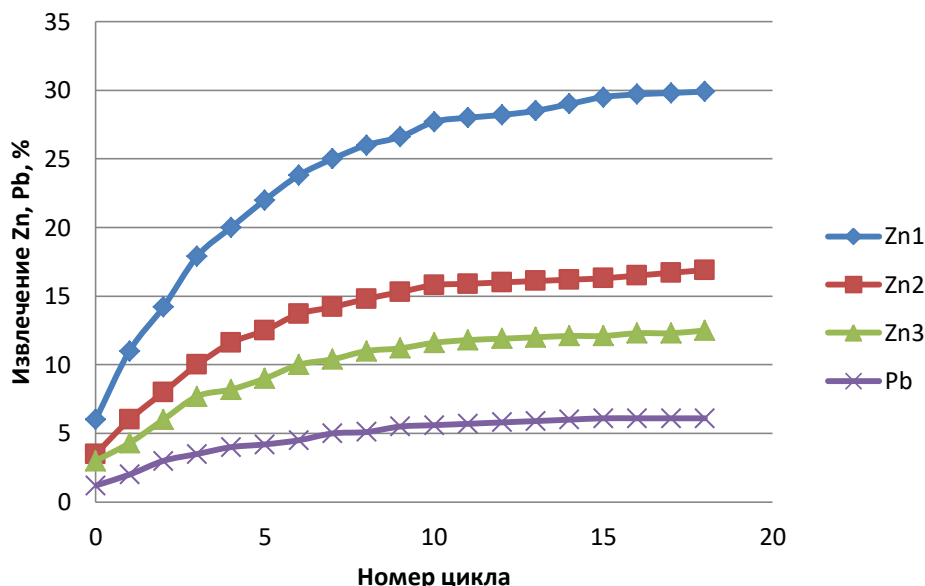


Рис. 1. Содержание цинка и свинца в пыли после рециклинга в дуговой сталеплавильной печи
Fig. 1. Zinc and lead content in dust after recycling in an electric arc furnace

установкой струей газа-носителя (сухой воздух под давлением 0,6 МПа) подавали на границу металл-шлак в количестве 80–150 кг/мин. Содержание цинка и свинца при этом возрастало в 1,5–2 раза за один цикл. Однако пневмосистемы являются ненадежными с точки зрения транспортировки и подачи шихты [44].

В печи ДСП-2 Белорусского металлургического завода (г. Жлобин, Республика Беларусь) пневматическую подачу пыли совместно с углеродистым восстановителем провести не удалось, смесь слеживалась в трубопроводе и бункере, а из-за большого количества подаваемого воздуха в печи формируется окислительная атмосфера и железо из пыли плохо восстанавливается. Было предложено проводить брикетирование пыли совместно с восстановителем. Исследования также проводили в условиях Белорусского металлургического завода, используя различные виды связующих для формирования брикетов, но по расчетам авторов [45] такой способ является экономически невыгодным.

Способ подачи пылей в конвертор в окискованном или брикетированном виде исследовали также фирмой «Стекло» (Канада), на заводах фирмы в городах Хилтон и Лейк-Эри [46].

Исследования, проведенные Волгоградским техническим университетом, а также на предприятии «Красный Октябрь», показали эффективность применения окисдоугольных брикетов в рециклинге пылей и шламов сталеплавильного производства [47].

ПЛАВКА В ПЕЧИ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ПОДОМ

В патенте [48] заявлен способ переработки пыли ЭДП в печах с вращающимся подом. В технологии железистый продукт, пыль и прокатную окалину смешивают с углеродистым восстановителем и шлакообразующими материалами и загружают в печь. Возгоны цинка улавливают и конденсируют. Смесь готовят таким образом, чтобы обеспечить содержание железа на уровне 50%. Шлакообразующую смесь добавляют в соотношении CaO/SiO_2 на уровне 0,6–1,6. Углеродистый восстановитель загружают из расчета содержания углерода в чугуне 1–4,5%. Далее осуществляют термообработку двухстадийным нагревом до 1200–1300°C, затем температуру повышают на 80–200°C. В способе, помимо получения оксида цинка, образуется твердофазный продукт с содержанием железа более 94%, при этом снижается расход восстановителя и топлива.

В статье [49] указано, что процесс переработки пыли в печах с вращающейся подиной – один из передовых пирометаллургических способов (не считая вельцевания), который используется в практике предприятий. Такие печи были введены в производство с 1998 по 2012 г. в США (4 печи), Японии (2), Корею (1). Но на сегодняшний день в США уже остановлено 2 агрегата из-за низких показателей производительности и экономической эффективности, однако в Корею установка работает весьма эффективно, но требуемый показатель экономического эффекта достигается при ежегодной переработке не менее 200 тыс. т пыли ЭДП.

Процесс ITmk3 (Ironmaking Technology Mark Three), разработанный японской компанией «Kobe Steel», является одним из передовых в железнотермической промышленности [50–55]. Технология реализуется в печах с вращающейся подиной (rotary hearth furnace – RHF), в качестве восстановителя применяется уголь взамен более дорогого кокса. По данным, представленным в статье [56], данный агрегат может перерабатывать различные по составу железосодержащие материалы (гематитовые, магнетитовые, сидеритовые руды и отходы металлургического производства). Процесс ведут при температуре около 1350°C, готовый продукт в виде гранулированного чугуна, по качеству не уступающего доменному, можно получить уже по истечении 9–14 мин. Получаемый в процессе шлак может быть легко отделен от чугуна, в частности, методом магнитной сепарации. В то же время авторами [57] утверждается, что в данном высокопроизводительном процессе возможно попутно извлекать цинк при переработке цинкосодержащего сырья, в том числе и пыли ЭДП. Таким образом, технология позволит получать одновременно три продукта: гранулированный чугун, который может быть использован в сталелитейной промышленности, в том числе и вместо лома, шлак, который может быть использован в производстве цемента, бетона и в дорожном строительстве и пыль, уловленную в рукавных фильтрах, содержащую, прежде всего, оксид цинка.

Схожими с предыдущим процессом являются технологии переработки пылей Fastmet и Fastmelt. В процессе Fastmet переработку окомкованного или гранулированного сырья в присутствии пылевидного углеродистого восстановителя ведут также в кольцевых печах с вращающейся подиной. По сути, сырье загружают на большой поворотный стол одним или двумя слоями. Нагрев осуществляется в ходе вращения стола горелками, установленными над слоем гранул. В процессе получают губчатое железо. Fastmelt отличается лишь тем, что аппаратная цепочка дополнена электропечью для выплавки чугуна или стали [58].

В 2000 году был запущен первый комплекс Fastmet на предприятии Hirohata Works of Nippon Steel Co производительностью 190 000 т в год пыли ЭДП [59]. Процесс позволяет получать богатый цинковый продукт с содержанием цинка 55–70%.

Процесс ZincOx, разработанный английской компанией ZincOx Resources Plc, признан лучшей технологией по переработке пыли ДСП в Республике Корея, поэтому в 2012 г. было запущено пилотное предприятие KRP на базе технологии. Его производительность составляет 200 тыс. т в год перерабатываемой пыли. Процесс на 1/3 экономичнее классического вельцевания благодаря следующим его преимуществам:

- большая производительность по извлекаемому цинку;
- замена дорогостоящего кокса углем;
- более высокое качество получаемого оксида цинка;
- формирование практически безотходного производственного цикла;
- утилизация и рециклинг тепловой энергии в процессе.

Основным агрегатом является кольцевая печь с вращающимся подом.

Реакционное пространство представляет собой кольцо диаметром 27 м и высотой 2 м. Нижняя (подовая) часть кольца вращается, совершая полный оборот за 15 мин. Температура процесса 1300°C достигается сжиганием газа в горелках. Схема реакционной части печи представлена на рис. 2 [60].

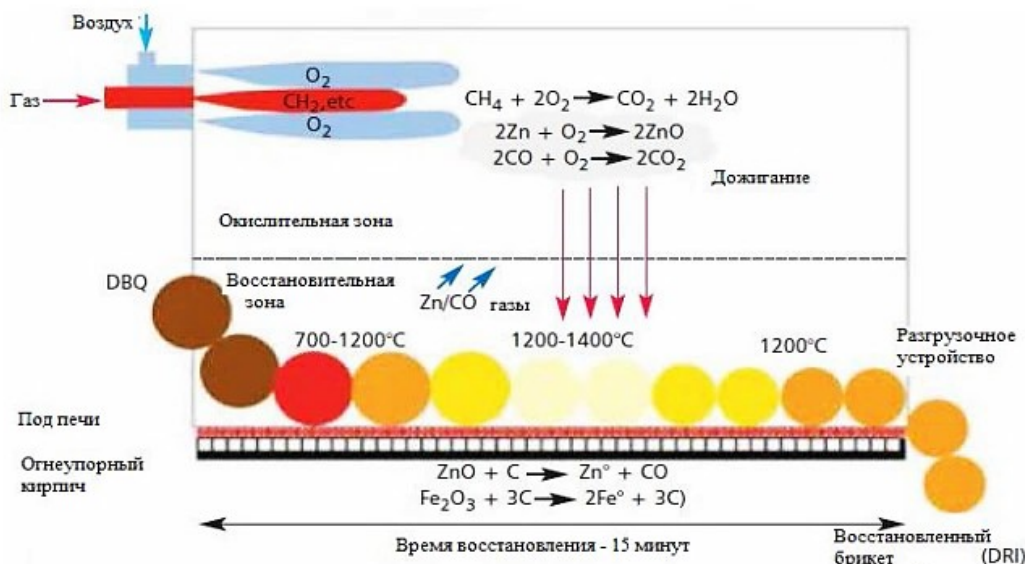


Рис. 2. Схема реакционной зоны процесса ZincOx [49]
Fig. 2. Diagram of the reaction zone of the ZincOx process [49]

Материал в печь загружают одним слоем в виде брикетов с помощью вибрационного питателя. Летучие компоненты возгоняются из брикетов, менее летучие образуют силикатный шлак, схожий с доменным. Железо остается в твердом состоянии, при этом около 85% всего железа восстанавливается в печи до металлического состояния и около 15% остается в форме оксида и переходит в шлак. Получаемые цинковые возгоны содержат около 60–65% цинка в форме оксида [61]. На корейском предприятии внедрены передовые установки газоочистки и системы отвода тепла и возврата его в процесс.

Еще одним процессом, использующим печь с вращающейся подиной, является разработанный в США процесс «Drylron», дословно «чистое железо». Эту разработку предложила фирма «Aum Research and Engineering» на основе разработок фирмы «Midland Ross». Шихту, приготовленную из пыли и кокса, агломерируют, далее нагревают до температуры около 1350°С. Извлечение цинка в данном процессе, как и в двух предыдущих, очень высоко – 95–97%. В ходе процесса «Drylron» большая часть железа, содержащегося в шихте, в ходе плавки переходит из окисленного состояния в металлическое [62]. Отличает этот процесс от большинства других подобных лишь способ окускования мелкодисперсного сырья в пыле-

угольные брикеты.

В печах с вращающимся подом перерабатывают также пыли в процессах «Inmetco» и «Comet».

Технология «Inmetco» была разработана Канадской компанией «International Nickel Company» (INCO) для переработки вторичного сырья, содержащего железо, никель, хром, цинк. Производительность процесса сравнительно небольшая и составляет около 45 тыс. т отходов в год. В качестве материалов применяют в основном отходы производства нержавеющей стали, но возможна переработка и пыли ЭДП. В результате Inmetco-технологии получают легированный чугун, возгоны цинка и свинца. На основе разработки есть ряд действующих предприятий в Пенсильвании (США), Тайланде и Канаде [63, 64].

Процесс «Comet» был разработан в исследовательском центре в Бельгии совместно с компанией «Paul Wurt» (Люксембург). В отличие от других процессов в печи с вращающимся подом, в этом случае сырье и угольный восстановитель загружают на под печи тонкими чередующимися слоями высотой 3–6 мм. Перерабатываемый материал также имеет мелкий размер (до 2 мм). Температура в печи 1300°C. В процессе обеспечивается высокая степень металлизации железа (около 90–95%) за счет меньшего размера ча-

стиц, однако из-за этого процесс проигрывает другим схожим в производительности. Степень возгонки цинка и свинца – 90–95%. Спекшийся материал дробят на выходе из печи и направляют в сталеплавильные печи [65, 66].

АГЛОМЕРАЦИЯ И ОКУСКОВАНИЕ

На многих предприятиях пыли ЭДП возвращают в аглофабрики и спекают совместно с вновь поступающим сырьем, шламами, коксовой мелочью и другими отходами [67]. Такие способы действуют на предприятиях компаний «Bethlehem Steel» (США) и «Inland Steel» (Австралия).

В докладе [68] был представлен способ обесцинкования пыли ЭДП путем их переработки агломерацией под давлением. По данным автора процесс имеет высокую производительность, низкие энергозатраты и высокое качество продукции – агломерата (для возврата в процессы производства стали) и цинковой пыли.

В работе [69] исследовали возможность переработки пылей в руднотермических печах. Технология разработана в ООО «Энерготерм-система» и позволяет получать чугуны и черновой цинк. В печь загружают брикеты из пыли ЭДП и углеродистого восстановителя, цинк и свинец улавливают в конденсаторах, а отходящие нагретые газы используют для подготовительной термической обработки брикетов.

Был предложен также высокоинтенсивный процесс переработки пылей и других цинксодержащих отходов плавкой в самовспенивающейся ванне [70]. По мнению автора, этот процесс обеспечивает большую производительность в отличие от традиционной восстановительной плавки.

Предложен способ VHR – обработка пыли в вакууме [71]. Процесс ведут в несколько этапов:

- 1) сухую пыль выдерживают в вакууме при давлении 133 Па и температуре 500–900°C;

- 2) восстанавливают цинк железом после восстановления FeO;

- 3) цинк испаряется, его улавливают в конденсаторах при температуре выше точки

кипения, но при том же низком давлении;

- 4) железистый продукт брикетируют и направляют в сталелитейные переделы.

Степень извлечения цинка в данном процессе близка к 100%.

ПЛАЗМЕННАЯ, ДУГОВАЯ И ВАКУУМНАЯ ПЛАВКА

Известна пирометаллургическая технология переработки пылей плавкой в факельном реакторе. Реактор представляет собой небольшой цилиндрический агрегат с диаметром внутренней части около метра, а высотой до 3 м. В качестве топлива в реакторе применяют природный газ, который подают в кислородно-воздушную смесь и сжигают, достигая тем самым температуры факела около 2000°C. Подаваемые в факел материалы расплавляются, образуя шлак, который сосредоточивается на дне реактора. Цинк возгоняется, переходит в газовую фазу, его улавливают в коллекторе в виде оксида, после чего направляют на дальнейшие стадии очистки и получение чистого оксида цинка. Оставшийся шлак, содержащий большое количество железа, сливают и направляют на сталеплавильный передел [72].

Достаточно известной на сегодняшний день является технология переработки пылей путем циклонной плавки (процесс «Contor»). Процесс проводят в плавильных циклонах, подачу сырья осуществляют тангенциально совместно с кислородным дутьем и топливом. Развиваемые в циклоне температуры – 1800–2000°C. Полученный расплав, как и в ранее описанном способе, опускается на дно агрегата, а цинк конденсируют и направляют на очистку. Основными преимуществами процесса «Contor» является то, что состав подаваемой шихты можно варьировать, цинк и другие возгоняемые металлы имеют высокое извлечение, а тепло, выделяемое в процессе, достаточно полно утилизируется [73, 74].

Фирмой Paul Wurth был предложен процесс «Primus». Данная технология осуществляется в две стадии с применением двух плавильных агрегатов – многоподовой (8 подов) вертикальной и электродуговой печей. Процесс достаточно неприхотлив с точки

зрения применяемого сырья. Температуры сравнительно невысокие – около 1100°C. Возгоняемый оксид цинка улавливают в рукавных фильтрах после необходимого охлаждения. Продуктами процесса «Primus» являются оксид цинка, чугун и инертный шлак, который нашел свое применение в дорожном строительстве. В 2009 г. компания «Dragon Steel Corporation» успешно запустила такую технологию с производительностью 120 тыс. т пыли на Тайване с соблюдением требуемых экологических нормативов [74, 75].

Получать одновременно три товарных продукта плавки позволяет процесс PIZO, запущенный в США в 2006 г. Данную технологию осуществляют в индукционных печах, процесс проводят в одну стадию. При этом переход железа в чугун составляет 95%, а содержание цинка в получаемом оксиде достигает 70% [76].

На предприятии «ThyssenKruppStahl» в Дуйсбурге реализован процесс «OXYCup». Переработка осуществляется в печах шахтного типа, шихтовые материалы, состоящие из пыли и восстановителя, загружают в окискованном виде, так называемых самовосстанавливающихся брикетах. Шихту загружают сверху, дутье подают противотоком снизу, таким образом материалы нагреваются до температур около 1000°C, железо и цинк начинают восстанавливаться. По окончании процесса получают чугун с содержанием углерода около 4% и шлак, оксид цинка улавливают и далее перерабатывают [77].

Достаточно высокими показателями производительности обладает процесс «ZEWA», разработанный на чешском предприятии «VítkoviceSteelworks». По данной технологии можно перерабатывать пылевидные отходы с высоким содержанием цинка и железа. Промпродукт, обогащенный углеродистым материалом, перерабатывают в электродуговых печах постоянного тока. Отличительной особенностью данного процесса от описанных ранее является то, что по окончании получают сталь, бедный шлак и вторичный промпродукт газоочистки. В этом процессе не получают готового цинкового продукта, но

производят качественную сталь, а пылевой продукт становится в разы богаче по цинку (50–70%) и свинцу, что дает возможность перерабатывать его гидрометаллургическими способами по упрощенным схемам [78].

Перспективными направлениями в металлургической переработке пылей черной металлургии являются технологии, основанные на плазменном нагреве материала. Плазменные технологии достаточно гибкие к параметрам процесса и исходному сырью, есть возможность сократить затраты времени и средств на предварительное окискование пыли. Технологий подобного рода на данный момент достаточно много, среди самых известных – «Tetronics», «ScanDust», «ArcFume», «Минтек» и др. [79].

В компании «Mintek» (США) исследовали технологии плазменно-дуговой переработки пыли. Один из процессов реализуется на постоянном токе. Основными элементами являются графитовые катод и анод (расплав в ванне печи). Для генерирования плазмы применяют азот или аргон. Через отверстие в графитовом электроде подается плазмогенерирующий газ. Пыль, предварительно окискованную, подают вместе с антрацитом и кремниевым флюсом. Антрацит служит восстановителем для цинка и свинца, при этом железо остается в окисленном состоянии в шлаке. В данном процессе извлечение цинка и свинца практически полное. Переходя в газ, цинк окисляется до оксида и его содержание в возгонах превышает 70–72%.

Этой же компанией в 1994 г. проведены испытания о возможности применения технологии «Envirodust», базирующейся на процессе «Enviroplas». Применяли две плазменно-дуговые печи и конденсатор для улавливания возгоняющегося цинка типа «Imperial Smelting» (улавливание каплями разбрызгиваемого жидкого свинца). В первой печи проводили расплавление материалов, а затем расплав направляли во вторую печь для имитации промышленного процесса подачи горячего шлака из доменной печи в печь для очистки. Схема процесса представлена на рис. 3 [80].

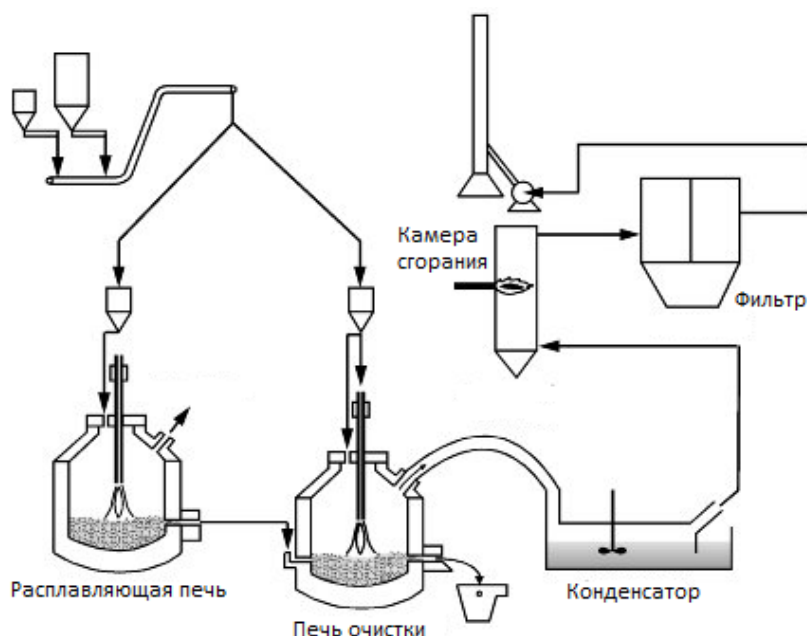


Рис. 3. Схема процесса Envirodust [69]
 Fig. 3. Diagram of the Envirodust process [69]

В процессе содержащиеся в пыли оксиды цинка и свинца сначала восстанавливают (коксом) до металлического состояния, а затем возгоняют, переводя в газовую фазу. Оставшийся железистый расплав и шлак сливают [81].

На одном из предприятий Норвегии разработан процесс «ArcFume». Шихта представляет собой смесь пыли с углеродным восстановителем (уголь, кокс). Цинк из пыли восстанавливается и возгоняется вместе с восстановительными газами, а затем улавливается в рукавных фильтрах, железо переходит в шлак в виде оксида. В процессе применен также плазменный нагрев.

Разработанный в Великобритании процесс «Tetronics» также является примером реализованного процесса плазменной переработки. Технология осуществляется в печах постоянного тока в атмосфере аргона. Шихта состоит из пыли, флюса и кокса. Восстановление ведут в диапазонах температур 1450–1550°C. В результате получают чугун, шлак и черновой оксид цинка. Преимущества данного процесса заключаются в том, что не требуется предварительное окускование сырья, процесс достаточно экологичен и универсален относительно подаваемого сырья, капитальные затраты значительно ниже, чем

для других подобных технологий [82].

На сегодняшний день разработано достаточно много различных технологий, которые позволяют эффективно перерабатывать пыль черной металлургии, содержащие цинк. Однако многие из них остались на стадии разработки, по некоторым проводили укрупненные промышленные испытания, но они не нашли широкого практического применения в силу различных причин. По словам авторов [38], шахтная печь компании «Mitsui» (Япония) требует огромных капитальных вложений, факельные виды плавки дороги и ненадежны, в эксплуатации многоподовых печей возникает множество проблем при обслуживании, плазменные виды плавки энергозатратны и имеют невысокую производительность. Процесс «Ausmelt» показал эффективность только при переработке остатков выщелачивания. К процессам, не нашедшим своего широкого промышленного применения, относятся «IBDZ-ZIPP» (Канада), «MRP» (Великобритания), реакторы кипящего слоя, печи барабанного типа и др. Исследованы способы с окускованием и без, при атмосферном и повышенном давлении, в атмосфере воздуха и вакууме, с применением твердых, газообразных и жидких восстановителей, электрического, топливного и плаз-

менного нагрева, процессы, осуществляемые в одну стадию, и многостадийные. Но, несмотря на большое разнообразие технологий, все они в основном решают частные задачи и имеют серьезные недостатки, ограничивающие их широкое распространение.

ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАБОТКИ ПЫЛИ

Гидрометаллургические процессы в сравнении с пирометаллургическими обеспечивают большую селективность по ценным компонентам, возможность регулирования технологических параметров для интенсификации. Такие процессы более гибки и позволяют перерабатывать пыли с постоянно изменяющимся составом. Меняя тип растворителя, можно практически селективно извлекать необходимый металл из пыли. Также гидрометаллургические процессы позволяют эффективно и рентабельно работать с материалами даже с низким содержанием ценного компонента. Многие гидрометаллургические процессы безопасней для экологии окружающей среды и человека. Как отмечалось ранее, пирометаллургические технологии в большинстве позволяют получать оксид цинка, тогда как на последней стадии гидрометаллургических технологий (электролиз) получают высокочистый металл (катодный цинк). В настоящий момент предложено достаточно много различных гидрометаллургических способов (в том числе и в комплексе с пиропроцессами) переработки пылей черной металлургии, хотя многие из них еще не нашли широкого промышленного применения (особенно в России). Большинство ученых и инженеров отмечают, что будущее вторичной металлургии именно за этими технологиями. Ниже рассмотрены разработанные на сегодняшний день гидрометаллургические технологии переработки цинксодержащей пыли, образующейся в ходе электродуговой плавки стали.

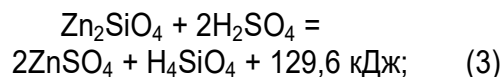
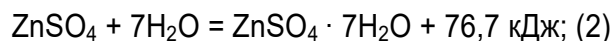
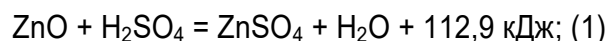
Гидрометаллургические способы основаны на растворении исходного вещества и переводе ценного компонента (цинка) в раствор в виде различных соединений. При этом остальная масса сырья, в данном случае соединения железа и пустая порода, остается в

виде твердого продукта – кека. Поскольку основным процессом гидрометаллургической технологии является растворение (выщелачивание), то и способы можно разделить на группы по типу применяемого растворителя – кислотное, щелочное, комплексообразующее.

КИСЛОТНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ

Выщелачивание серной кислотой.

Процесс выщелачивания с использованием серной кислоты считается важным этапом в гидрометаллургии цинка как из первичного, так и из вторичного сырья. Он включает растворение цинксодержащих минералов в разбавленной серной кислоте с образованием сульфатного цинкового раствора по реакциям:



где Me – Cd, Cu, Co, Ni, Fe, As и редкие металлы. В гидрометаллургии передел «выщелачивание» включает совокупность операций: растворение компонентов материала в серной кислоте, отстаивание, сгущение и фильтрацию пульпы, гидролитическую очистку раствора сульфата цинка от примесей.

При этом сульфат цинка (ZnSO_4) легко растворяется в воде, и на него кислота не расходуется, феррит цинка ($\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) растворяется в слабой серной кислоте значительно труднее, чем оксид цинка. Кремнекислый цинк ($2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$) сравнительно легко растворяется в слабой серной кислоте, однако его присутствие в исходном материале нежелательно, так как ортосиликат цинка служит основным источником загрязнения раствора кремнекислотой, ухудшающей отстаивание и особенно фильтрацию растворов. А сульфид цинка в разбавленных растворах кислоты практически не растворяется⁹.

Кислота – дешевый реагент, получаемый на большинстве предприятий по производству меди и цинка при утилизации отходящих сернистых газов. Гидрометаллургические процессы с применением серной кислоты хорошо отработаны и изучены, протекают интенсивно и эффективно. Однако сернокислый способ выщелачивания имеет весомый недостаток. Пыль черной металлургии представлена главным образом соединениями железа и цинка, причем доля железа в пыли чаще всего значительно превышает количество цинка. Таким образом, в равной степени интенсивно протекает растворение и железа и цинка (чаще железо растворяется активнее). Так, по предварительным данным кислота будет реагировать примерно на 60% с соединениями железа и только на 40% – цинка. В том случае, если в пыли присутствуют другие кислоторастворимые соединения активных металлов (кальция, магния), на цинк будет расходоваться только 10% серной кислоты. По этой причине растворы получаются богатыми по железу и бедными по целевому цинку. Очистка таких растворов от железа является дорогостоящей и проблематичной по известным причинам. Растворенное железо мешает удалению ионов меди, кадмия и кобальта в процессе очистки таких растворов. Кроме того, ионы железа способствуют коррозии анодов и увеличивают удельный расход электроэнергии при электролизе цинка [83].

Выщелачиванию цинка серной кислотой из пыли ЭДП посвящен целый ряд исследований [84–88]. В них изучалось влияние концентрации, температуры, продолжительности выщелачивания и скорости перемешивания.

Автор [89] показал, что количество растворенного цинка увеличивается в соответствии с продолжительностью выщелачивания при определенных значениях pH и температуре окружающей среды. Температуру выщелачивания контролировали на уровне 60°C, а скорость вращения дискового образца составляла 600 об/мин. По мере уменьшения значения pH количество растворенно-

го цинка увеличивалось. В этих условиях наиболее высокая концентрация выщелоченного оксида цинка была получена при низком pH равном 1.

Изучая сернокислотное выщелачивание, М. Круэллс с соавторами [89] подчеркнули, что частицы цинка практически не зависят от активности серной кислоты в исследованном диапазоне условий, тогда как для частиц железа скорость реакции зависит от активности кислоты. Таким образом, извлечение цинка, содержащегося в наиболее реакционноспособных частицах, представляет собой реакцию нулевого порядка по активности серной кислоты.

Коллектив авторов в работе [85] показал, что извлечение цинка увеличивается с увеличением продолжительности выщелачивания. Они проводили эксперименты при следующих условиях: температура варьировалась от 20 до 80°C, концентрация H_2SO_4 составляла 0,4 М, соотношение Ж:Т (кислота:пыль) = 1,2 и продолжительность выщелачивания 20 мин. Было обнаружено, что при температуре 40°C было извлечено 50% цинка, в то время как при температуре 80°C и продолжительности выщелачивания 60 мин было извлечено 55% цинка. Авторы исследовали влияние соотношения твердое вещество/жидкость при температуре 20°C, концентрации H_2SO_4 0,4 М, продолжительности выщелачивания 60 мин и обнаружили, что экстракция цинка увеличивается с увеличением соотношения. Результаты показывают, что при соотношении Ж:Т = 0,4 процент извлеченного цинка составлял 40%, при соотношении Ж:Т = 0,6 извлечение увеличилось до 45%, и при соотношении к Ж:Т = 1,2 составляло 51%.

Согласно данным [88], выход цинка из пыли ЭДП увеличивается с повышением температуры при высокой концентрации серной кислоты и достигает примерно 75% при 84°C после 60 мин выщелачивания. Доказано также, что концентрация кислоты влияет на скорость извлечения цинка.

Выщелачивание растворами серной кис-

⁹Кляйн С. Э., Козлов П. А., Набойченко С. С. Извлечение цинка из рудного сырья: учеб. пособ. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2009. 492 с.

лоты с низкой концентрацией от 0,1 до 2,0 М в интервале температур от 18 до 60°C может быть частичным решением проблемы феррита цинка в пыли. Для богатого цинксодержащего сырья реакционная скорость по цинку практически не зависит от концентрации серной кислоты в исследованном диапазоне в отличие от реакционной скорости по железу. Таким образом, можно извлечь в раствор 90% цинка и менее 50% железа. Основной сложностью применения этого метода является сильное обводнение технологической цепочки: при переработке 1 т пыли может получаться около 20–25 т растворов. Испытания осуществлялись в полупромышленном масштабе, и промышленного применения метод пока не нашел.

Х. Уян и его соавторы [90] разработали новый трехступенчатый процесс извлечения цинка и железа из остатков от выщелачивания цинка: восстановительный обжиг, кислотное выщелачивание и магнитная сепарация. Феррит цинка в остатке может эффективно разлагаться до ZnO и Fe_3O_4 в атмосфере CO , CO_2 и Ar , при этом эффективность выщелачивания цинка составляет 61,4%, в то время как растворенное железо составляет всего 25,34%, после магнитной сепарации выход железа увеличивается до 80,90%.

Коллектив исследователей во главе с П. Оустадакисом [91] изучал характеристики и выщелачивание разбавленной серной кислотой. Ж. Лангова и ее соавторы [92] провели атмосферное выщелачивание отходов сталеплавильного производства и осаждение гематита из раствора сульфата железа.

Результаты выщелачивания серной кислотой при атмосферном и повышенном давлении пыли (с содержанием 26% цинка, 40% железа) сталелитейного завода США показали примерно одинаковую эффективность выщелачивания цинка. Извлечение цинка было от 32% (при использовании растворов с концентрацией серной кислоты 0,2 М) до 76% (концентрация серной кислоты 2 М) с помощью автоклава при параметрах выщелачи-

вания (2 ч, 270°C) и от 53% (0,2 М) до 79% (2 М) при помощи атмосферного выщелачивания (4 ч, 70°C). При использовании серной кислоты высокой концентрации (4 М) была достигнута степень извлечения цинка на уровне 97%, но при этом в раствор почти полностью перешло железо.

П. Цакиридис и его соавторы [93] изучали гидрометаллургический процесс восстановления цинка из пыли ЭДП, сосредоточиваясь на выщелачивании разбавленной серной кислотой с перемешиванием и разработке процесса очистки раствора после выщелачивания для извлечения высокочистого цинка электроэкстракцией.

Цинк не может быть извлечен без растворения железа при атмосферном давлении, и поэтому изучалось извлечение цинка из отходов сталеплавильного производства с помощью кислотного выщелачивания под давлением и осаждения гематита с использованием микроволнового излучения [94]. В качестве выщелачивающего агента применяли разбавленную серную кислоту, а температура была относительно высокой, что привело к осаждению большей части железа (III) в виде гематита.

П. Ксантопулосу [95] удалось из насыщенного раствора, полученного при выщелачивании пыли ЭДП серной кислотой, выделить цинк химическим осаждением. Извлечение цинка достигло 99,5% в виде осадка гидроцинкита ($3ZnCO_3 \cdot 3Zn(OH)_2$) и гидрата гидроксида карбоната цинка ($ZnCO_3 \cdot 3Zn(OH)_2 \cdot H_2O$). В качестве осаждающих агентов использовались Na_2CO_3 и $(NH_4)_2CO_3$.

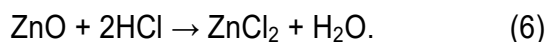
В работе [96] отмечается, что максимальная степень извлечения цинка в раствор при сернокислотном выщелачивании составляет 87% при использовании 1-молярного раствора при 80°C и Ж:Т = 50:1 или в растворах с концентрацией 0,25 моль/дм³ и отношении Ж:Т = 20.

В работе¹⁰ был исследован способ интенсификации процесса сернокислотного выщелачивания методом нагрева раствора микро-

¹⁰ Попов А. А. Гидрометаллургическая технология переработки цинксодержащей пыли сталеплавильного производства: дис.... канд. тех. наук: 05.16.02. СПб., 2016. 115 с.

волнами. Данный способ нагрева обеспечивает более низкие затраты электроэнергии, быстрый нагрев пульпы. Согласно представленным в статье данным, выщелачивание цинка завершалось за несколько минут. В случае выщелачивания с обычным нагревом растворов при температуре 50°C затрачиваемая энергия составляет 0,6 кВт·ч, тогда как при микроволновом нагреве около 0,1 кВт·ч. Извлечение цинка в таком способе увеличивается на 10–20%, с повышением мощности установки увеличивался и уровень извлечения. Эффективность процесса объясняется перегревом пульпы и взаимодействием микроволн с частицами пыли.

Выщелачивание соляной кислотой. Известны способы выщелачивания пыли ЭДП в других кислотах, например в соляной кислоте для преобразования оксидов металлов в хлориды металлов [97] по реакции:



Т. Йошида [86] показал, что количество извлеченного цинка увеличивается со временем, а извлечение растет с уменьшением pH. Он также сосредоточил внимание на влиянии температуры на цинк, извлекаемый с помощью выщелачивания соляной кислотой, и обнаружил, что с увеличением температуры и продолжительности выщелачивания увеличивается и извлечение цинка.

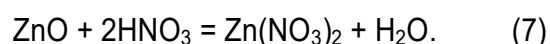
Ж. Лангова и ее соавторы [98] изучали селективное выщелачивание цинка из феррита цинка соляной кислотой, а также влияние температуры на металлы, извлекаемые из феррита цинка, и показали, что с повышением температуры процент цинка, извлеченного из феррита цинка, также растет. Этот результат был подтвержден Дж. Джерзи и П. Островской [99], которые изучали выщелачивание пыли ЭДП различными кислотными растворами, такими как серная, соляная и азотная кислоты; они пришли к выводу, что выщелачивание соляной кислотой является лучшим вариантом для выщелачивания цветных металлов из пыли ЭДП.

В работе [100] авторами отмечены эффективность и рентабельность проведения солянокислого выщелачивания цинксо-

жащей пыли конвертерного производства на АО «АрселорМиттал Темиртау» (Казахстан) – ведущей мировой компании по производству стали. Источником соляной кислоты для выщелачивания служат отработанные растворы травильного отделения (это отделение горячего цинкования предприятия). Пыли ДСП значительно богаче конвертерных пылей по содержанию цинка, но технология может быть применена и к этим пылям с предварительной оптимизацией технологических параметров.

Выщелачивание азотной кислотой. Хотя при гидрометаллургической переработке пылей ЭДП с использованием HNO_3 было достигнуто достаточно высокое извлечение цинка, исследование этого метода ограничено из-за высокой стоимости растворителя и связанных с этим способом опасных выбросов закиси азота. Поэтому он считается дорогостоящим, неэкологичным и небезопасным процессом [101]. Тем не менее, был зарегистрирован ряд патентов, использующих HNO_3 в качестве выщелачивающего агента, например, зарегистрированный У. Ф. Дринкардом и Х. Дж. Вернером [101]. В таких случаях пыль ЭДП сначала промывают водой для удаления хлоридов, а затем выщелачивают в растворе азотной кислоты.

Уравнение реакции оксида цинка и разбавленной кислоты имеет вид:



Использование электролитического и/или сульфидного осаждения полученного раствора обеспечивает удаление железа, а также удаление тяжелых металлов, которые испаряются и разлагаются. Полученный продукт снова выщелачивают водой для удаления нитрата кальция. Затем остаток обрабатывают комплексообразователями на основе аминов металлов для извлечения цинка; марганец и магний впоследствии извлекают разделением в кислоте.

Выщелачивание органическими кислотами. Исследовали также выщелачивание пыли в некоторых органических кислотах, например, в уксусной кислоте. В первую очередь пыль ЭДП тщательно очищают от хло-

ридных соединений, поскольку даже незначительное их содержание приводит к высоким показателям извлечения железа в раствор. Содержащиеся в пыли цветные металлы при воздействии уксусной кислоты переходят в форме ацетатов в раствор. При этом железо остается в твердом остатке, там же остаются и другие малорастворимые примеси. Оставшиеся кеки с минимальным содержанием цинка (около 2%) рекомендовано возвращать в процессы черной металлургии. Раствор направляют на сульфидное осаждение цветных металлов, в том числе и цинка, путем обработки сероводородом. Получаемые сульфиды отделяют от раствора и направляют на производство цинка. Хотя данный способ и обеспечивает высокие показатели извлечения цинка (около 80%), но в то же время наряду с сульфидом цинка осаждаются и сульфиды других цветных металлов – кадмия, меди, свинца, что требует дополнительных затрат при дальнейшей переработке этого полупродукта. Технология была реализована в промышленном масштабе в США, однако низкая рентабельность производства привела к закрытию предприятий [102, 103].

В работе [104] изучалась возможность

выщелачивания цинка из пыли органическими кислотами. В качестве растворителя авторами были предложены акриловая кислота (пропановая, $C_3H_4O_2$), акриловая кислота совместно с метилбензолом, этановая (уксусная), пропандиовая (малоновая), этандиовая (щавелевая). Согласно результатам, при использовании акриловой кислоты совместно с метилбензолом удалось достигнуть извлечения цинка около 86 % при одновременном извлечении железа 0,1%. На рис. 4 представлена диаграмма показателей извлечения цинка и железа с использованием различных органических и неорганических кислот.

Из рис. 4 очевидно, что в большинстве кислот при достаточно высоком извлечении цинка в раствор 75–98% железо также хорошо извлекается на 20–50%. Кислоты, проявляющие селективность по отношению к цинку, демонстрируют низкий показатель извлечения цинка – на уровне 30–40%.

Щелочное выщелачивание. Выщелачивание с использованием щелочного раствора – более реализуемый процесс при гидрометаллургической переработке отходов, таких как пыли ЭДП, из-за высокого отношения железо /цинк и особенно вследствие высокого

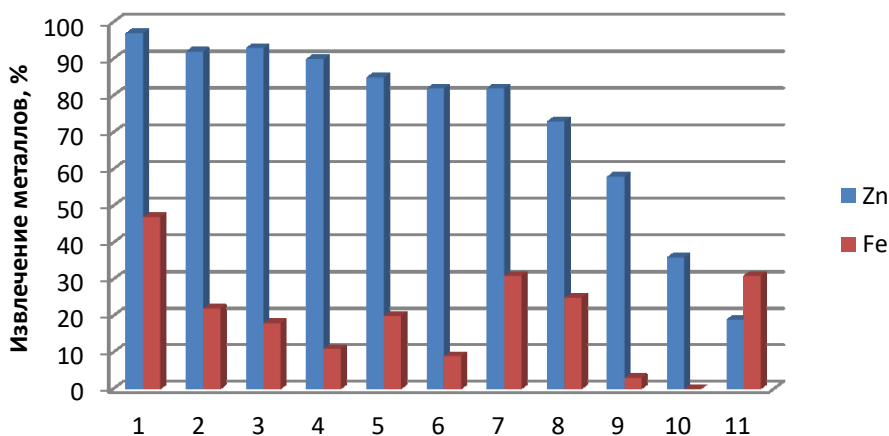


Рис. 4. Извлечение цинка и железа в различных кислотах с концентрацией 1 моль/дм³:

1 – серная кислота; 2 – фосфорная кислота; 3 – малоновая кислота;
4 – полиакриловая кислота; 5 – азотная кислота; 6 – акриловая кислота; 7 – лимонная кислота;
8 – соляная кислота; 9 – уксусная кислота; 10 – бензойная кислота; 11 – щавелевая кислота

Fig. 4. Extraction of zinc and iron in various acids with 1 mol/dm³ concentration:

1 – sulfuric acid; 2 – phosphoric acid; 3 – malonic acid; 4 – polyacrylic acid; 5 – nitric acid;
6 – acrylic acid; 7 – citric acid; 8 – hydrochloric acid; 9 – acetic acid; 10 – benzoic acid;
11 – oxalic acid

содержания галогенов, негативно влияющего на электролиз сульфатного электролита. Сложность, связанная с кислотным выщелачиванием, приводит к большому интересу к процессу селективного выщелачивания, при котором не потребляется повышенное количество кислот для растворения других связанных металлов, таких как кальций, железо, магний, алюминий, медь и других [105, 106]. Железо является преобладающим металлом в пыли ЭДП, оно растворяется в кислой среде, но не в щелочной. Таким образом, щелочное выщелачивание становится более привлекательной альтернативой селективному выщелачиванию ценных металлов из пыли.

Для выщелачивания ценных металлов из пыли используется несколько щелочных агентов, основные из них – гидроксид натрия, карбонат аммония и аммиак. Выщелачивание цинка и свинца из пыли в щелочных растворах зависит от продолжительности выщелачивания, концентраций щелочных растворов, фазового соотношения и температуры выщелачивания. Затем свинец извлекают цементацией, а цинк – электролизом из щелочного выщелачивающего раствора.

Выщелачивание в растворе гидроксида натрия. Известны способы переработки пыли с использованием в качестве реагента каустической соды [107], поскольку железо в щелочах не растворяется, а некоторые другие компоненты пыли неактивно переходят в раствор. Таким образом, преобладающими компонентами, которые содержатся в растворах после выщелачивания, являются цинкат- и плюмбат-ионы, что значительно упрощает процесс последующей очистки. Выщелачивание цинка протекает по следующей химической реакции:



Извлечение цинка зависит от массового соотношения NaOH/пыль и структуры ферритов [105].

А. Дж. Б. Дутра, П. Р. П. Пайва, Л. М. Таварес [106] использовали различные методы щелочного выщелачивания для растворения цинка, присутствующего в пылях ЭДП. Они

изучили обычное выщелачивание с перемешиванием, выщелачивание под давлением, обычное выщелачивание после предварительной микроволновой обработки, выщелачивание при обработке ультразвуком с перемешиванием. Выяснилось, что ультразвуковое перемешивание не повлияло на извлечение цинка. В их исследовании после 4-часового выщелачивания при температуре 90°C и концентрации NaOH 6 М максимальное извлечение цинка из пыли ЭДП составило около 74%.

При наличии в пыли кремния он также переходит в раствор под воздействием щелочи, однако в данном случае предусмотрена очистка от него при добавлении гидроксида кальция с образованием труднорастворимого силиката [107].

В Германии был исследован малозатратный процесс щелочной обработки пылей ДСП. Из электрофильтров ее направляют в бассейн с водой, куда подают щелочь, доводя растворы до pH до 9,3–9,8. Цинк и свинец переходят в растворимые соединения, затем полученную пульпу разбавляют водой, проводят осветление и обезвоживание фильтрацией на пресс-фильтрах; полученный после гидролитического осаждения свинца и цинка концентрат направляют на цинковые заводы [108].

Автор [109] определил оптимальные условия для выщелачивания с использованием каустической соды: температура 95°C, соотношение Ж:Т = 7:1, 10 М NaOH, продолжительность выщелачивания – 2 ч. Он также указал, что извлечение цинка увеличивается с ростом соотношения Ж:Т. В указанных условиях было извлечено 85% цинка и 90% свинца. Оставшиеся металлические примеси (свинец, медь, кадмий и т. д.) удалялись щелочным электролизом цинка после цементации цинка при 50°C.

В работе [110] авторы исследовали способ селективного извлечения оксида железа и оксида цинка. Пыли в виде пульпы со щелочью подают в реактор вихревого слоя и обрабатывают магнитным полем. Затем разделяют образовавшиеся первичные раствор и осадок. Вторичную пульпу получают добавлением технической воды, щелочи, соды

и извести и снова подают в реактор с магнитным полем. Таким образом, в первом реакторе получают оксиды железа, а во втором – оксиды цинка.

Стоит заметить, что сульфид и феррит цинка в щелочи практически не растворяются, а, значит, при большой доле их в сырье общее извлечение цинка будет сравнительно низким.

Способ имеет также и ряд других недостатков. Одним из основных является высокая стоимость щелочи, а, следовательно, необходимость по возможности наиболее полной ее регенерации. Также стоит отметить, что процессы выщелачивания в щелочи требуют использования дорогостоящего и сложного автоклавного оборудования.

При наличии в пыли щелочных элементов предложено проводить предварительное водное выщелачивание для снижения потерь каустика.

Комбинированная обработка со щелочным выщелачиванием. Доказано, что комбинация пирометаллургических и гидрометаллургических методов помогает улучшить переработку комплексного сырья, содержащего несколько металлов.

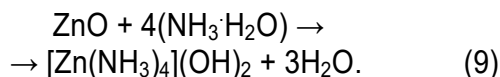
П. Халли и его соавторы [111] изучали гибридный обжиг с выщелачиванием пыли органической кислотой. Пыль ЭДП подвергали обжигу с гидроксидом натрия при 450°C и последующему выщелачиванию при 40°C лимонной кислотой. Таким методом обработки было достигнуто извлечение 100% цинка и 80% свинца.

Коллектив авторов во главе с К. Ли [106] получил сверхмелкозернистый цинковый порошок со средним диаметром около 10 мкм из промышленных отходов, богатых цинком, используя щелочное выщелачивание с NaOH. Извлечение цинка и свинца при выщелачивании составило более 80% и 90%, соответственно. Оставшиеся свинец, олово и алюминий отделяли на стадии очистки при добавлении Na₂S, цинк и CaO. В заключении проводили электролиз раствора сульфата цинка.

Аммиачное выщелачивание. Существуют также способы аммиачного выщелачивания пылей ДСП. Этот способ может быть

применен к металлам (медь, никель и цинк), способным образовывать аммиачные комплексы. Водный раствор аммиака также является основанием, поэтому этот способ относят к щелочным.

При взаимодействии оксида цинка с гидратом аммиака получается гидроксид тетраамминцинка (+2) и вода.



На сегодняшний день аммиачное выщелачивание нашло промышленное применение в производстве меди и никеля. Для извлечения цинка способ также эффективен с точки зрения его селективности по отношению к железу. Если в пыли ЭДП содержатся медь и никель, то они также будут переходить в растворы, однако, как показывает практика, их содержание в пылях ничтожно мало. Существенным недостатком способа к переработке пыли черной металлургии является наличие феррита цинка, который устойчив в таких средах, а, следовательно, извлечение цинка в раствор не превышает 30–40%.

Аммиачное выщелачивание исследовали во многих работах. Так, авторы [112] указывают, что максимальное извлечение цинка было достигнуто при использовании в качестве реагента 2-молярного раствора хлорида аммония при температуре 70°C в течение 2 ч, при этом железо не растворялось и оставалось в остатке выщелачивания в форме Ca₂Fe₂O₅.

В работе [113] выщелачивание проводили в растворе сульфата аммония с концентрацией 4 моль/дм³ при температуре 90°C в течение 4 ч. Было достигнуто извлечение по цинку 85%.

Предложен также способ выщелачивания в растворе соли (NH₄)₂SO₄·Fe(SO₄) в автоклавных условиях при температуре 220°C в течение 10 ч. Извлечение цинка составило 93,2% [114].

Выщелачивание в хлоридных и аммиачно-хлоридных растворах. Известен способ выщелачивания пыли в растворах тиомочевина и холин хлорида под воздействием

ультразвуковой кавитации. Расход растворителя составляет 115 см^3 на 1 г пыли ЭДП. Выщелачивание вели при температуре 60°C , пульпу обрабатывали ультразвуком на установке Hielscher UIP 1000hd мощностью 315 Вт. Согласно [115], ультразвук повышает извлечение цинка, и через 5 мин обработки было достигнуто его извлечение на 25% выше.

Авторы [116] проводили выщелачивание пыли в растворах хлорида аммония с концентрацией $4,93 \text{ моль/дм}^3$ при 80°C в течение 2 ч. Согласно представленным результатам, извлечение цинка в раствор составляет 97%.

Испанская компания «Tecnicas Reunidas SA (TR)» в 1970 г. разработала процесс «ZINCEX», а в конце 1980-х усовершенствовала его до «Modified ZINCEX Process» (MZP).

«ZINCEX» – процесс, позволяющий перерабатывать первичное и вторичное цинковое сырье и извлекать цинк из хлоридной среды в присутствии значительного количества примесей. Основной стадией является жидкостная экстракция, используемая для концентрирования и очистки цинкового раствора, из которого можно получать цинк марки SHG, сульфат и оксид цинка, другие химические соединения. Сначала разработанный ZINCEX-процесс включал две цепочки жидкостной экстракции (анионной и катионной). Из-за сложности его в большинстве случаев заменили на MZP-процесс [117]. Технология включает следующие операции: выщелачивание, экстракцию, промывку, реэкстракцию, стадию регенерации.

Для извлечения цинка из водной фазы в органическую на первой стадии MZP богатый раствор контактирует с органическим раствором. Органическая фаза, состоящая из раствора DEPHA (ди-2-этилгексилфосфорной кислоты) в керосине, способна извлекать цинк по технологии MZP. В условиях, используемых TR, такие примеси, как Co, Cu, Ni, Cd, Mg, Mn, Cl, F и Ca не переходят на следующую стадию процесса, а селективность органической фазы по цинку очень высокая [118].

Захват жидкости и следы соэкстрагирующихся примесей удаляют из органического экстракта подкисленной водой в соответ-

ствующих условиях с получением очень чистого органического экстракта цинка.

Цинк из промытого органического экстракта реэкстрагируют раствором кислоты с получением чистого раствора сульфата цинка, пригодного для получения цинка марки «SHG», ZnSO_4 , ZnO и пр.

Этап регенерации органики частично проводят с использованием раствора HCl , чтобы поддерживать постоянное количество соэкстрагирующихся примесей, например железа, которые не выводятся при промывке и реэкстракции [72].

Хотя эта технология и обеспечивает эффективное и селективное извлечение цинка, все же экстракция является весьма «капризным» процессом, требует строгого соблюдения параметров для поддержания эффективности органической фазы и высокого сквозного извлечения целевого компонента.

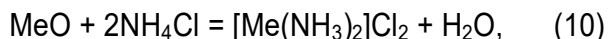
Известна одна из перспективных гидрометаллургических технологий переработки пыли ЭДП – технология «EZINEX», основанная на использовании растворов аммиачных солей, которые более эффективны по сравнению с водными растворами аммиака.

Технология «EZINEX» (от англ. «Engitec Zinc Extraction») была разработана компанией Engitec в Италии в 1993 г. На одном из крупнейших сталелитейных заводов запустили опытную установку, заявленная производительность процесса – до 500 т пыли ЭДП в год. Технология позволяет перерабатывать различные цинксодержащие материалы – пыль из электродуговых печей, оксиды процесса вельцевания, цинковую золу и др. Первую промышленную установку технологии «EZINEX» запустили в 1996 г. с максимальной производительностью 12 тыс. т в год [119].

Процесс включает в себя несколько основных стадий: выщелачивание цинка из пыли ЭДП; очистку раствора от примесей; электроэкстракцию цинка; очистку раствора от хлоридов щелочных металлов.

Выщелачивание пыли проводят отработанным электролитом, содержащим хлориды аммония, щелочных металлов и цинк с концентрацией цинка $10\text{--}15 \text{ г/дм}^3$, в течение 1 ч при температуре процесса около 60°C .

Содержащиеся в пыли оксиды переходят в раствор по реакции:



где Me – Zn, Cd, Cu, Ni, Mn, 2Ag, Ca, Mg.

Свинец растворяется по реакции:



Хлориды натрия и калия просто растворяются в воде, практически не принимая участия в химических реакциях, и повышают общую концентрацию солей в растворе.

Оксид цинка растворяется с высокой скоростью, а феррит цинка и оксиды железа остаются в осадке. Для отделения твердого остатка, содержащего в основном оксиды железа и феррит цинка от электролита, образующуюся пульпу фильтруют на фильтр-прессе.

Кек с влажностью 16–20% подсушивают до влажности не более 10%, смешивают с 15% угольной пыли, гранулируют, сушат до влажности около 5% и возвращают в ЭДП.

Богатый цинком раствор после выщелачивания очищают от растворенных примесей. Из-за существенного различия их свойств очистку раствора перед электролизом проводят в две стадии: сначала цементацией на цинковом порошке осаждают примеси, имеющие более положительный, чем у цинка, потенциал, затем осаждают примеси, не удаляемые на первой стадии.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Переработка вторичного сырья, содержащего более одного целевого металла, является сложным процессом и требует эффективного контроля с настройкой многофакторного анализа.

М. Ву и соавторы [120] описали эффективную систему экспертного контроля для процесса выщелачивания на плавильных заводах цветных металлов. Эта система используется для определения и отслеживания оптимальных уровней pH на основе комбинации математических моделей.

С. Л. Касик и Х. П. Мейснер [121] решили

некоторые проблемы, возникающие в гидрометаллургических процессах, предоставив методы для расчета концентраций ионов, давления пара и пределов растворимости, а также для прогнозирования коэффициентов активности в обычно встречающихся диапазонах температур и часто вплоть до концентраций насыщения.

Коллектив авторов [122] провел сравнительное исследование по выбору выщелачивающего реагента для извлечения металлов из пыли ЭДП с использованием 16 сред – от кислотных (органических и неорганических) до основных. Был сделан вывод, что если рассматривать извлечение основных компонентов – цинка и железа, то аммоний является наиболее селективной средой, в то же время в качестве наиболее экологически чистой среды для выщелачивания была рекомендована лимонная кислота.

ДРУГИЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ

Возможна стабилизация состава пылей с переводом в химически инертное состояние с помощью химической обработки или термическое превращение их в стекловидный материал. Это позволяет предотвратить вымываемость вредных веществ атмосферными осадками и хранить полученные материалы на обычных отвалах. После спекания материал возможно применять в строительстве. Однако при этом из пылей ЭДП не извлекается ни цинк, ни свинец, ни железо, и хотя вред, наносимый окружающей среде, снижается, по-прежнему захоронение занимает площади отвалов. Варианты с остеклением пылей ЭДП в данный момент не реализуются из-за экологических сложностей, поскольку при применении в строительстве такие материалы со временем превращаются в тонкую пыль, выделяющую кадмий и свинец.

Р. Л. Найренда [123] привел в своей обзорной статье наиболее распространенные промышленные высокотемпературные технологии и обсудил их экономические преимущества и недостатки.

Ранее пыль ЭДП использовалась для производства удобрений и реагентов, но в настоящее время с ужесточением экологических нормативов и закрытием отвалов вред-

ных отходов исчезают варианты ее утилизации.

Стоит упомянуть недавно появившиеся способы использования пыли черной металлургии, кратко описанные ниже.

Из-за высокой плотности, небольшого размера частиц и низкой удельной поверхности пыли ЭДП авторы [124] использовали добавку ее до 25% в качестве полимерного наполнителя для производства толстого листа для звукоизоляции в автомобильной промышленности.

К. Баренече и другие [125–139] применяли пыль в качестве наполнителя в полимерной матрице для производства плотных листовых материалов с фазовым переходом PCM (от англ. phase change material) – материалов, известных своей способностью накапливать тепло и, таким образом, снижать потребление энергии. Пыль действует как звукоизоляция, а PCM – как теплоизоляция, что делает этот листовой материал подходящим для включения в качестве слоя конструктивной системы для повышения внутреннего комфорта (теплового и акустического) в зданиях при их ремонте. Чтобы установить возможности такого материала, его сравнили с коммерчески доступным листом Texsound от «TEXSA» (Испания), где он показал аналогичные акустические свойства и лучшие тепловые характеристики.

Пыли ЭДП нашлось применение в гражданском строительстве [126, 127]. В работе [128] использовали ее в качестве модификатора для подавления реакций гидратации портландцемента, а также для повышения сопротивления строительных материалов.

Авторы [129] производили керамический материал с использованием глины и до 20% пыли ЭДП. Затем смесь обжигали при температуре от 800 до 1100°C. Они также изучали механическую прочность, линейную усадку, водопоглощение, кажущуюся плотность и прочность на изгиб, а также выщелачивание металлов при различных температурах и составах.

Е. Ф. Ледесма с соавторами [130] герметизировали ЭДП методом стабилизации/затвердевания в растворах на основе цемента. Испытания на выщелачиваемость произве-

денного цементного раствора показали значительное снижение выделения тяжелых металлов, за исключением свинца. М. да Силва Магелаес также показал улучшение механических свойств цементного раствора при добавлении до 5% пыли в растворную смесь [131].

Хотя возможности рециклинга пыли в металлургической отрасли уделяется большее внимание, некоторые исследователи ведут поиски направлений использования пыли в других отраслях [132, 133].

Одним из направлений рециклинга пыли электросталеплавильных печей является ее использование для очистки сточных вод. С. В. Свергузовой в работах [134, 135] исследована возможность использования пыли электросталеплавильного производства Оскольского электросталеплавильного металлургического комбината им. А. А. Угарова для очистки сточных вод от тяжелых металлов. Состав металлургической пыли, %: Fe_{общ} – 40,3; FeO – 8,0; CaO – 14,0; SiO₂ – 8,0; MgO – 5,0; Al₂O₃ – 0,3; MnO – 3,0; C – 2,5; Zn – 1,5; S – 0,49; Pb – 0,4; Cr₂O₃ – 0,28. Эффективность очистки ионов Ni (II) и Cu (II) составляет 99,2 и 99,5%, соответственно, при добавлении 0,15 г пыли на 100 мл. По утверждению авторов, результаты показали высокую эффективность очистки и возможность достижения нормативных требований к сбрасываемым сточным водам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе выполнен литературный обзор разнообразных подходов к переработке пылей электродуговой плавки черной металлургии как сложного материала, являющегося источником тяжелых металлов и железа. Внедрение многих процессов переработки пыли ЭДП столкнулось с техническими или экономическими проблемами, когда получаемые продукты оказывались недостаточного качества или затраты на переработку были несопоставимы с доходом от реализации извлекаемых элементов на рынке.

Пыли ЭДП рассматриваются законодательством разных стран как опасные отходы, поэтому на территории Европы и Северной Америки их захоронение остается под запре-

том или ограничивается, что требует значительных финансовых вложений. Поэтому выбор технологии переработки должен основываться на экономических преимуществах, а также исключении ущерба окружающей среде.

Наиболее широко применяются пирометаллургические технологии, однако большая часть из них не обеспечивает селективность по конкретному металлу, в частности по цинку, вместе с ним возгоняется свинец, а также и другие металлы. Среди основных недостатков можно отметить высокие затраты на топливо (дорогостоящий кокс) и электроэнергию при относительной невысокой стоимости конечных продуктов. Почти во всех пирометаллургических технологиях конечным продуктом является цинк в виде черного оксида цинка, который значительно дешевле металлического цинка и менее востребован.

Наименее изученными, но при этом более перспективными и экологичными являются гидрометаллургические процессы переработки пылей черной металлургии. При этом такие технологии позволяют получать металлический цинк.

Преимуществами гидрометаллургических методов являются низкое энергопотребление, высокая растворимость цинка в различных выщелачивающих агентах и возможность рециклинга остатка в ЭДП. Эти гидрометаллургические процессы более экономичны из-за более низких капитальных и эксплуатационных затрат, но процесс очистки значительно усложняется. Таким образом, основной проблемой остается поиск экономичного и экологически безопасного процесса извлечения цинка и железа из остатков выщелачивания цинка.

С другой стороны, гидрометаллургические методы сталкиваются с недостатком железа, остающегося в растворе при оптимальных условиях выщелачивания больших количеств растворенного феррита цинка, особенно при выщелачивании в кислой среде, отделение которого является технически сложным и финансово затратным процессом.

Аммиачно-хлоридное выщелачивание цинка позволяет относительно селективно извлекать цинк из вельц-возгонов пылей ЭДП. При этом образующийся цинковый электролит пригоден для дальнейшего извлечения цинка электроэкстракцией с получением катодного цинка, который может быть реализован на современном рынке. Оптимизация условий выщелачивания позволяет получать растворы с максимальным содержанием цинка.

Анализ разнообразных гидрометаллургических процессов показал, что они являются перспективными вариантами для обработки таких отходов черной металлургии, как пыли электродуговой плавки с потенциалом высокого извлечения металлов.

В последние годы пыль ЭДП стали использовать в гражданском строительстве в качестве модификатора для цемента, а также как наполнитель листовых звукоизолирующих материалов.

Стоит иметь в виду, что для получения конкретных рекомендаций по переработке определенного типа пыли необходимы предварительные исследования с уточнением ее химического и фазового составов и разработка программы пилотных испытаний на производстве.

Список источников

1. Леонтьев Л. И., Дюбанов В. Г. Техногенные отходы черной и цветной металлургии и проблемы окружающей среды // Экология и промышленность России. 2011. № 4. С. 32–35.
2. Перескока В. В., Камкина Л. В., Пройдак Ю. С., Стовпченко А. П., Квичанскан М. И. Восстановительно-тепловая обработка пыли электрофильтров дуговой сталеплавильной печи // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2010. Вып. 21. С. 13–16.
3. Шалимов А. Г. Установка для обработки пыли, об-

- разующейся в электродуговой печи // Новости черной металлургии за рубежом. 2001. № 1. С. 47–48.
4. Адоньев С. М., Филиппов О. В. Пылегазовые выбросы предприятий черной металлургии. М.: Металлургия, 1973. 200 с.
5. Киселев А. Д., Тулуевский Ю. Н., Зинуров И. Ю. Повышение эффективности газоудаления дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1992. 112 с.
6. Стовпченко А. П., Камкина Л. В., Пройдак Ю. С., Дервянченко И. В., Кучеренко О. Л., Бондаренко М. Ю. Теоретические и экспериментальные исследования состава и

- восстановимости пыли дуговых сталеплавильных печей // *Электromеталлургия*. 2009. № 8. С. 29–36.
7. Патрушов А. Е., Немчинова Н. В., Черных В. Е., Тютрин А. А. Современные методы переработки техногенного сырья электросталеплавильного производства // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. Т. 22. № 4. С. 183–190. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-183-190>.
8. Nemchinova N. V., Chernykh V. E., Tyutrin A. A., Patrushov A. E. Extraction of Zinc and Iron from Electrosmelting Dust // *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. No. 5. P. 368–372. <https://doi.org/10.3103/S0967091216050090>.
9. Mchado J. G. Characterization study of electric arc furnace dust phases // *Materials Research*. 2006. Iss. 1. P. 30–36. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>.
10. Machado J. G. M. S., Brehm F. A., Moraes C. A. M., dos Santos C. A., Vilela A. C. F., da Cunha J. B. M. Characterization study of electric arc furnace dust phases // *Materials Research*. 2006. Vol. 136. Iss. 3. P. 953–960. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>.
11. Zunkel A. D. Recovering zinc and lead from electric arc furnace dust: a technology status report // 4th International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials / eds. D. L. Jr. Stewart, J. C. Daley, R. L. Stephens. Warrendale: Minerals, Metals & Materials Society, 2000. P. 227–236.
12. Coman V., Robotin B., Ilea P. Nickel recovery/removal from industrial wastes: a review // *Resources, Conservation and Recycling*. 2013. Vol. 73. P. 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.019>.
13. Gajski G., Oreščanin V., Garaj-Vrhovac V. Chemical composition and genotoxicity assessment of sanitary landfill leachate from Rovinj, Croatia // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2012. Vol. 78. P. 253–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.11.032>.
14. Симонян Л. М., Хилько А. А., Лысенко А. А., Михалчан А. А., Сельникова П. Ю. Электросталеплавильная пыль как дисперсная система // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2010. № 11. С. 68–75.
15. Rizescu C.-Z., Bacinschi Z., Stoian E.-V., Poinescu A.-A. Characterization of steel mill electric-arc furnace dust [Электронный ресурс]. URL: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2010/Tunisia/WWAI/WWAI-25.pdf> (18.03.2021).
16. Недин В. В., Нейков О. Д., Алексеев А. Г., Кривцов В. А. Взрывоопасность металлических порошков. Киев: Наукова думка, 1971. 140 с.
17. Зайцев А. К., Похвиснев Ю. В. Экология и ресурсосбережение в черной металлургии // *Соросовский образовательный журнал*. 2001. Т. 7. № 3. С. 52–58.
18. Черноусов П. И. Рециклинг. Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов в черной металлургии: монография. М.: ИД «МИ-СиС», 2011. 428 с.
19. Доронин И. Е., Свяжин А. Г. Промышленные способы переработки сталеплавильной пыли // *Металлург*. 2010. № 10. С. 48–53.
20. Козлов П. А., Затонский А. В., Паньшин А. М. Исследования и разработка технологии по удалению примесей из вельц-окси, полученной после переработки пылей ЭДП // *Инновационные разработки в горно-металлургической отрасли: матер. VI Междунар. конф.: в рамках IX Междунар. выставки «MinTech-2011»* (г. Усть-Каменогорск, 19 мая 2011 г.). Усть-Каменогорск: Изд-во Вост.-Казахст. техн. ун-та им. Д. Серикбаева, 2011. С. 189–193.
21. Kozlov P. A. The Waelz process. М.: ИД «Руда и Металлы», 2003. 160 p.
22. Gunter M., Vopel K.-H., Janssen W. Untersuchungen zur verwertung von stauben und schlamm aus den abgasreinigungen von hochofen- und blasstahlwerken im drehrohrfurn // *Stahl und Eisen*. 1976. Vol. 96. No. 24. P. 1228–1238.
23. Грудинский П. И., Корнеев В. П., Дюбанов В. Г. Карботермическое восстановление пыли электроплавки стали с извлечением цветных металлов и железа // V Междунар. конф.-шк. по хим. технологии (ХТ'16): тез. докл. (г. Волгоград, 16–20 мая 2016 г.). Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2016. Т. 2. С. 171–172.
24. Kozlov P. A., Povysheva E. V., Zolkina A. V., Vorobiev A. G. Modern situation and perspectives of waelz-process usage for zinc extraction from dust of electric arc furnaces // *Цветные металлы*. 2009. № 7. С. 36–40.
25. Panshin A., Kozlov P. Research and development of complex technology for zinc and indium recovery from oxidized raw material and waste utilization // *Lead-Zinc 2010: Proceedings of 49-th Annual Conference of Metallurgists* (Vancouver, 3–6 October 2010). Vancouver, 2010. P. 1255–1261.
26. Naimanbayev M. A., Lokhova N. G., Abisheva A. E., Maldybayev G. K., Barkytova B. N. Effect of some conditions of charge preparation on zinc distillation from oxidized ore // *Complex Use of Mineral Resources*. 2017. No. 1. С. 40–46.
27. Котенев В. И., Барсукова Е. Ю. Брикеты из мелкодисперсных отходов металлургического и коксохимического производства - экономически выгодная замена традиционной шихты металлургических переделов // *Металлург*. 2002. № 10. С. 42–45.
28. Бабанин В. И., Еремин А. Я., Бездежский Г. Н. Разработка и внедрение новой технологии брикетирования мелкофракционных материалов с жидким стеклом. Часть 1 // *Металлург*. 2007. № 1. С. 68–71.
29. Быстров В. А., Новиков Н. И. Инновации путь повышения конкурентоспособности металлургических предприятий // *Вестник Кемеровского государственного университета*. 2010. № 1. С. 47–53.
30. Летимин В. Н., Насыров Т. М., Макарова И. В. Оценка пирометаллургических способов обесцинкования пыли и шламов сталеплавильных цехов // *Теория и технология металлургического производства*. 2013. № 1. Т. 13. С. 67–70.
31. Пат. № 2484153, Российская Федерация, МПК C22B7/02, C22B19/30. Способ утилизации пыли электросталеплавильных печей / С. И. Иваница, С. И. Логиновских, В. А. Мальцев, С. А. Меламуд, А. В. Мокрецов, Д. Ю. Храмов; заявитель и патентообладатель С. И. Иваница, С. И. Логиновских, А. В. Мокрецов, Д. Ю.

Храмов. Заявл. 09.08.2010; опубл. 10.06.2013. Бюл. № 16.

32. Пат. № 2507280, Российская Федерация, МПК C22B19/38, C22B1/02, C22B7/00. Способ переработки цинксодержащих металлургических отходов / В. Г. Дюбанов, А. В. Затонский, П. А. Козлов, Л. И. Леонтьев, А. М. Паньшин, Ю. В. Решетников; заявитель и патентообладатель ОАО «Челябинский цинковый завод». Заявл. 05.09.2016; опубл. 26.07.2017. Бюл. № 23.

33. Найманбаев М. А., Лохова Н. Г., Балтабекова Ж. А., Баркытова Б. Н. О возможности переработки цинксодержащих пылей ЗСМК и Северстали с рудой месторождения Шаймерден // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: тр. III Конгр. с междунар. участием и Конференции молодых ученых V Форума «Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов» (г. Екатеринбург, 5–9 июня 2017 г.). Екатеринбург: УрО РАН, 2017. С. 178–182.

34. Ким В. А., Торговец А. К., Джундибаев М. К., Кударинов С. К., Богоявленская О. А., Нурмуханбетов Ж. У. Получение низкофосфорного спецкокса для электро-термического производства из неспекающихся углей Шубаркольского месторождения // Повышение технического уровня горно-металлургических предприятий на основе инновационных технологий: материалы VII Междунар. конф. (г. Усть-Каменогорск, 2013 г.). Усть-Каменогорск. 2013. С. 296–298.

35. Смирнов Л. А. Разработка комплексной схемы утилизации железосодержащих отходов // Сталь. 2001. № 1. С. 89–90.

36. Ульянов В. П., Булавин В. И., Дмитриев В. Я., Артамонов А. П. Экономическая оценка технологического процесса комплексной переработки железосодержащих пылей и шламов металлургических переделов с получением металлизированных окатышей // Интеграция технологий та энергосбережения. 2013. No. 1. С. 91–96.

37. Ким В. А., Требухова Т. А., Ким С. В., Бивойно Д. Г. Новый углеродный восстановитель карбонизат рексил для металлизации железосодержащего сырья // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований, V Форума «Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов»: тр. Конгресса с междунар. участием и Конференции молодых ученых (г. Екатеринбург, 5–9 июня 2017). Екатеринбург: УрО РАН, 2017. С. 212–214.

38. Паньшин А. М., Шакирзянов Р. М., Избрехт П. А., Затонский А. В. Основные направления совершенствования производства цинка на ОАО «Челябинский цинковый завод» // Цветные металлы. 2015. № 5. С. 19–21. <https://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.03>.

39. Panshin A. M., Kozlov P. A., Shakirzyanov R. M., Zatonsky A. V., Kongoli F. Development and implementation of a new technology for recycling of metallurgical wastes with the recovery of zinc, lead, tin and iron // Shechtman International Symposium: 2014 Sustainable Industrial Processing. 2014. Vol. 4. P. 309–315.

<https://doi.org/10.13140/2.1.1602.0800>.

40. Шалимов А. Г. Рециркуляция отходов черной металлургии // Новости черной металлургии за рубежом. 2000. № 3. С. 53–55.

41. Демин А. В., Рожков А. И., Грудницкий О. М., Николаев В. В., Феклистов А. В. Поиск способов утилизации пыли дуговых сталеплавильных печей на Белорусском металлургическом заводе // Литье и металлургия. 2015. № 3. С. 76–80.

42. Каширина А. О., Ростовский В. И. Утилизация цинксодержащих сталеплавильных пылей и шламов // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: V Междунар. науч. конф. аспирантов и студентов (г. Донецк, 11–13 апреля 2006 г.). Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2006. Т. 1. С. 58–59.

43. Chacrabarti A. K. Steel Making. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2012. 240 p.

44. Лопухов Г. А. Получение более качественной пыли в дуговых печах фирмами «Крупп» и «ДДС» // Новости черной металлургии за рубежом. 1997. № 2. С. 59–63.

45. Рожкова А. И., Ермакова Е. В. Поиск способов утилизации пыли дуговых сталеплавильных печей на Белорусском металлургическом заводе. Часть третья. Опыты по брикетированию пыли дуговых сталеплавильных печей // Литье и металлургия. 2015. № 4. С. 93–97.

46. Вишкарёв А. Ф. Рециклинг пыли и шламов в конвертерных цехах // Новости черной металлургии за рубежом. 1996. № 3. С. 70–72.

47. Годанский Н. А. Опыт использования железосодержащих брикетов в сталеплавильном производстве // Металлург. 2003. № 1. С. 43–45.

48. Пат. № 2626371, Российская Федерация, МПК C22B7/02, C21B11/06, C22B19/38. Способ переработки отходов металлургического производства / С. Ю. Одеров, И. Б. Федосов, А. П. Баранов, В. Е. Черных, А. Е. Патрушов; заявитель и патентообладатель ООО «Урал-рециклинг». № 2016135884; заявл. 05.09.2016; опубл. 26.07.2017. Бюл. № 21.

49. Якорнов С. А., Паньшин А. М., Козлов П. А., Ивакин Д. А. Современное состояние переработки пылей электродуговых печей в России и за рубежом // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований, V Форума «Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов»: Труды III Конгресса с международным участием и Конференции молодых ученых (г. Екатеринбург, 5–9 июня 2017 г.). Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2017. С. 64–69.

50. Kikuchi S., Ito S., Kobayashi I., Tsuge O., Tokuda K. ITmk3® Process // Kobelco technology review. 2010. No. 29. P. 77–84.

51. Kobayashi I., Tanigaki Y., Liagami A. A new process to produce iron directly from fine ore and coal // Iron and Steelmaker. 2001. No. 9. P. 19–22.

52. Dubrovsky V. A., Starikov A. I., Panishev N. V., Redin E. V., Knyazev E. V. Direct Reduction of Ti-V Magnetite via ITmk3 Technology // 4th International symposium on high-temperature metallurgical processing (San Antonio, 3–7 March 2013). San Antonio, 2013. P. 45–48.

53. Дубровский Б. А., Шиляев П. В., Редин Е. В. Металлизация шпатовых железняков Бакальского месторождения с получением гранулированного чугуна // Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология: сб. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 80-летию ММК (г. Москва, 15–20 октября 2012 г.). М., 2012. С. 178–182.
54. Юнес Р., Опрышко И. А., Лобода П. И. Анализ технологий прямого восстановления оксидов металлов с применением печей с вращающимся подом // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». 2011. № 61. С. 184–192.
55. Gordon Y., Els J. ITmk3 technology and its application for mining and steel industry in Ukraine and Russia // International Conference on Ironmaking Technology (Kyiv, 21 March 2007). Kyiv, 2007. P. 128–131.
56. Tanaka H., Miyagawa K., Harada T. FASTMET, FASTMELT and ITmk3: development of new coal-based ironmaking processes // RHF Technologies. 2011. No. 5. P. 15–19.
57. Панишев Н. В., Бигеев В. А., Черняев А. А. Переработка мелкозернистых отходов металлургического производства с получением гранулированного чугуна и извлечением цинка // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 4. С. 26–29.
58. Clelland J. M., Metius G. E. Recycling ferrous and nonferrous waste streams with Fastmet // Journal of the minerals, metals and materials Society. 2003. No. 8. P. 30–34.
59. Tsutsumi H., Yoshida S., Tetsumoto M. Features of FASTMET® Process // Kobelco technology review. 2010. 29. P. 85–92.
60. Баранов А. П., Федосов И. Б., Тлехугов Н. В. Перспективы промышленного рециклинга цинксоодержащей пыли электрометаллургического производства в России // Металлургия-Интехэко-2014: сб. докл. и каталог участников VII Междунар. конф. (г. Москва, 25–26 марта 2014 г.). М.: ООО «Интехэко», 2014. С. 71–76.
61. Баранов А. П. Экологические проблемы при переработке цинксоодержащей пыли дуговых сталеплавильных печей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2012. № 7. С. 91–95.
62. Daiga V. R., Home D. A. Production of crude zinc oxide from steel mill waste oxides using a rotary health furnace // Recycling of Metals and Engineered Materials / eds. D. L. Stewart, J. C. Daley, R. L. Stephens. Warrendale: TMS, 2000. P. 361–368. <https://doi.org/10.1002/9781118788073.ch31>.
63. Money K. L., Hanewald R. H., Bleakney R. R. Processing steel wastes pyrometallurgically at Inmetco // Recycling of Metals and Engineered Materials / eds. Stewart D. L., Daley J. C., Stephens R. L. 2013. P. 28–35. <https://doi.org/10.1002/9781118788073.ch34>.
64. Pargeter J. K., Hanewald R. H., Dombrowski D. E. Operating experience at INMETCO and application of the process to the production of DRI // Conservation & Recycling. 1985. Vol. 8. No. 13. P. 363–375. [https://doi.org/10.1016/0361-3658\(85\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0361-3658(85)90006-2).
65. Borlée J., Steyls D., Colin R., Munnix R., Economopoulos M. Comet: un procédé utilisant du charbon pour produire une éponge de fer de qualité à partir de minerai fin // Revue de Métallurgie. 1999. Vol. 96. No. 3. P. 331–340. <https://doi.org/10.1051/metal/199996030331>.
66. Chatterjee A., Banshidhar P. *Metallurgy for steelmaking: production and use*. New Delhi: Allied Publishers LTD, 2001. 732 p.
67. Ковалев В. Н. Технология комплексной переработки цинксоодержащей пыли и шлама с получением металлургического чернового цинка и железа // Сталь. 2013. № 2. С. 72–76.
68. Кологриев К. А. Обесцинкование шламов и пылей в процессе агломерации под давлением // Международный симпозиум, посвященный проблеме комплексной переработки техногенных отходов металлургического производства (г. Москва, 8 октября 2009 г.). М.: Изд-во ФГУП ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, 2009. С. 49–52.
69. Schoukens A. F. S., Jones R. T., Denton G. M. Pilot-plant production of Prime Western grade zinc from lead blast-furnace slag using the Enviroplas process // Recycling of Metals and Engineered Materials, Third International Symposium: Third International Symposium (Point Clear, Alabama, November 1995). Point Clear, Alabama, 1995. P. 857–868.
70. Леонтьев В. Г. Высокоинтенсивный процесс переработки цинк-содержащих техногенных отходов плавкой в самовспенивающейся оксидной ванне // Международный симпозиум, посвященный проблеме комплексной переработки техногенных отходов металлургического производства (г. Москва, 8 октября 2009 г.). М.: Изд-во ФГУП ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, 2009. С. 62–65.
71. Мельниченко И. А., Куренков Д. С., Липина А. В. Выщелачивание цинка из пыли шламовых отвалов сталеплавильного производства предприятий горно-металлургического комплекса с последующим электролизом // Современные технологии в области производства и обработки цветных металлов: матер. XII науч.-практ. конф. (г. Москва, 12 ноября 2015 г.). М.: ВНИИМЕТМАШ, 2016. С. 372–378.
72. Тарасов А. В., Бессер А. Д., Мальцев В. И. Металлургическая переработка вторичного цинкового сырья. М.: Гинцветмет. 2004. 219 с.
73. Johansson L.-G. CONTOP now at MEFOS // Newsletter from mefos - the foundation for metallurgical research. 2010. No. 1. P. 2–5.
74. Both I., Houbart M., Roth J.-L. Advanced technologies for residue treatment - successful start-up of the PRIMUS® plant of Dragon Steel in Taiwan // Iron & Steel technology conference: British Library Conference Proceedings (Pittsburgh, 2010). Pittsburgh, 2010. P. 209–216.
75. Лошкарев А. Н., Матюнина Е. В. Внедрение процесса ПРАЙМУС (PRIMUS) в ДСП-80 ОАО «Металлургический завод им. А. К. Серова» // Теплотехника и

информатика в образовании, науке и производстве: сб. докл. IV Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2015) с междунар. участием, посвященной 95-летию основания кафедры и университета (г. Екатеринбург, 26–27 марта 2015 г.). Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2015. С. 93–95.

76. Bratina J. E., Lenti K. M. PIZO furnace demonstration operation for processing EAF dust // *Iron & Steel Technology*. 2007. No. 4. P. 118–122.

77. Holtzer M., Kmita A., Rocznik A. The recycling of materials containing iron and zinc in the oxycup process // *Archives of Foundry Engineering*. 2015. Vol. 15. No. 1. P. 126–130.

78. Fleischanderl A., Gennari U., Ilie A. ZEWA - metallurgical process for treatment of residues from steel industry and other industrial sectors to generate valuable products // *Ironmaking & Steelmaking*. 2004. No. 6. P. 444–449. <https://doi.org/10.1179/irs.2004.31.6.444>.

79. Schoukens A. F. S., Nelson L. R., Barcza N. A. Plasma-arc treatment of steel-plant dust and zinc-containing slag - theoretical and practical considerations // *Recycling of lead and zinc the Challenge of the 1990s: Proceedings of the International Conference (Rome, 11–13 June 1991)*. Rome, 1991. P. 361–370.

80. Архипова Л. В., Федоров А. Н. Выщелачивание цинка из пыли сталеплавильного производства с использованием NaOH // 70-е Дни науки студентов НИТУ «МИСиС»: сб. статей / под ред. М. Г. Рахутина, А. С. Вознесенского, С. И. Диденко, Д. В. Кузнецова, П. В. Петровского, А. В. Алпатов. М.: ИД «МИСиС», 2015. С. 93–95.

81. Barcza N. A., Robertson D. G. C., Schoukens A. F. S., Shaw F., Denton G. M., Worcester T. W., Bailey D. J. Enviropas technology for the recovery of lead and zinc from lead blast-furnace slags // *Recycling Lead and Zinc into the 21st Century: Proceedings of the 6th International Conference (Madrid, 18–23 June 1995)*. Madrid: International Lead and Zinc Study Group, 1995. P. 296–312.

82. Серегин П. С., Попов В. А., Цемехман Л. Ш. Новые методы переработки материалов, содержащих цинк, олово и свинец // *Цветные металлы*. 2010. № 10. С. 27–33.

83. Блинкова Е. В., Елисеев Е. И. Кинетика растворения оксида цинка в водных растворах уксусной кислоты // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2005. № 5. С. 8–10.

84. Havlík T., Souza B. V., Bernardes A. M., Schneider I. A. H., Mišková A. Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust // *Journal of Hazardous Materials*. 2006. Vol. 135. No. 1-3. P. 311–318. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.067>.

85. Havlik T., Turzakova M., Stopić S., Friedrich B. Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid // *Hydrometallurgy*. 2005. Vol. 77. No. 1. P. 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.10.008>.

86. Yoshida T. Leaching of zinc oxide in acidic solution // *Materials Transactions*. 2003. Vol. 44. No. 12. P. 2489–2493. <https://doi.org/10.2320/matertrans.44.2489>.

87. Özverdi A., Erdem M. Environmental risk assessment and stabilization/solidification of zinc extraction residue: I. Environmental risk assessment // *Hydrometallurgy*. 2010. Vol. 100. Iss. 3-4. P. 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.10.011>.

88. Ye Guozhu, White J. F., Wei L. Y. Association of halogens in electric arc furnace dust and zinc oxide fume before and after leaching // *Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology (REWAS 1999): Proceedings Extraction and Process Metallurgy Meeting (San Sebastián, 5–9 September 1999)*. San Sebastián, 1999. P. 1503–1510.

89. Cruells M., Roca A., Núnēz C. Electric arc furnace flue dusts: characterization and leaching with sulphuric acid // *Hydrometallurgy*. 1992. Vol. 31. Iss. 3. P. 213–231. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90119-K](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90119-K)

90. Yan Huan, Chai Li-yuan, Peng Bing, Li Mi, Peng Ning, Hou Dong-ke. A novel method to recover zinc and iron from zinc leaching residue // *Minerals Engineering*. 2014. Vol. 55. P. 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.09.015>.

91. Oustadakis P., Tsakiridis P. E., Katsiapi A., Agatzini-Leonardou S. Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD): part I: characterization and leaching by diluted sulphuric acid // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 179. No. 1-3. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.059>.

92. Langová Š., Rípková J., Vallová S. Atmospheric leaching of steel-making wastes and the precipitation of goethite from the ferric sulphate solution // *Hydrometallurgy*. 2007. Vol. 87. No. 3-4. P. 157–162. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.03.002>.

93. Tsakiridis P. E., Oustadakis P., Katsiapi A., Agatzini-Leonardou S. Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD). Part II: downstream processing and zinc recovery by electrowinning // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 179. Iss. 1-3. P. 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.004>.

94. Langová Š., Matýsek D. Zinc recovery from steel-making wastes by acid pressure leaching and hematite precipitation // *Hydrometallurgy*. 2010. Vol. 101. Iss. 3-4. P. 171–173. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.003>.

95. Xanthopoulos P., Agatzini-Leonardou S., Oustadakis P., Tsakiridis P. E. Zinc recovery from purified electric arc furnace dust leach liquors by chemical precipitation // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2017. Vol. 5. Iss. 4. P. 3550–3559. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.07.023>.

96. Rao S. R. Resource recovery and recycling from metallurgical wastes. Montreal: Elsevier Science, 2006. 580 p.

97. Van Weert G., Peek E. M. L. Reagent recovery in chloride hydrometallurgy - some missing links // *Hydrometallurgy*. 1992. Vol. 29. Iss. 1-3. P. 513–526. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90030-4](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90030-4).

98. Langová Š., Leško J., Matýsek D. Selective leaching of zinc from zinc ferrite with hydrochloric acid // *Hydrometallurgy*. 2009. Vol. 95. Iss. 3-4. P. 179–182. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.040>.

99. Jerzy G., Ostrowska P. Leaching of EAF dust with

- acidic solutions // *Ars Separatoria Acta* 2005: Proceedings of the XXth International Symposium on Physico-Chemical Methods of the Mixtures Separation (Szklarska, 20–23 June 2003). Szklarska Poręba, 2005.
100. Катренов Б. Б., Жумашев К. Ж., Нарембекова А. К., Мусина А. Е. Определение оптимальных параметров обесцинкования конвертерного шлама растворов соляной кислоты // *Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований*, V Форума «Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов»: тр. Конгресса с междунар. участием и Конференции молодых ученых (г. Екатеринбург, 5-9 июня 2017). Екатеринбург: УрО РАН, 2017. С. 174–177.
101. Patente no. 5.980.842, United States. Separation of calcium from metal compounds / Jr. W. F. Drinkard, H. J. Woerner. Depose 28.02.1997; publ. 04.09.1997.
102. Vazarlis H. G. Hydrochloric acid-hydrogen peroxide leaching and metal recovery from a Greek zinc-lead bulk sulphide concentrate // *Hydrometallurgy*. 1987. Vol. 19. Iss. 2. P. 243–251. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(87\)90008-9](https://doi.org/10.1016/0304-386X(87)90008-9).
103. Barrett E. C., Nenniger E. H., Dziwinski J. A hydro-metallurgical process to treat carbon steel electric arc furnace dust // *Hydrometallurgy*. 1992. Vol. 30. Iss. 1-3. P. 59–68. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90077-D](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90077-D).
104. Leclerc N., Meux E., Lecuire J. M. Hydrometallurgical recovery of zinc and lead from electric arc furnace dust using mononitritotriacetate anion and hexahydrated ferric chloride // *Journal of Hazardous Materials*. 2002. Vol. 91. No. 1-3. P. 257–270. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00394-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00394-6).
105. Youcai Zhao, Stanforth R. Integrated hydrometallurgical process for production of zinc from electric arc furnace dust in alkaline medium // *Journal of Hazardous Materials*. 2001. Vol. 80. No. 1-3. P. 223–240. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00305-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00305-8).
106. Li Qiang, Zhao Youcai, Jiang Jiachao, Zhang Chenglong. Optimized hydrometallurgical route to produce ultrafine zinc powder from industrial wastes in alkaline medium // *Procedia Environmental Sciences*. 2012. Vol. 16. P. 674–682. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.093>.
107. Пат. № 2617086, Российская Федерация, МПК C22B 19/00 (2006.01), C22B 7/00 (2006.01), C22B 3/12 (2006.01). Способ селективного извлечения оксида железа и оксида цинка из шламов и пылей газоочисток металлургических агрегатов / Г. А. Фарнасов, В. И. Ковалев, И. Ф. Курунов, А. М. Бижанов, И. Н. Вершинин; заявитель и патентообладатель Г. А. Фарнасов, А. М. Бижанов. № 2016108792; заявл. 11.03.2016; опублик. 19.04.2017. Бюл. № 10.
108. Dutra A. J. B., Paiva P. R. P., Tavares L. M. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust // *Minerals Engineering*. 2006. Vol. 19. Iss. 5. P. 478–485.
109. Larba R., Boukerche I., Alane N., Habbache N., Djerad S., Tifouti L. Citric acid as an alternative lixiviant for zinc oxide dissolution // *Hydrometallurgy*. 2013. Vol. 134–135. P. 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.02.002>.
110. Бигеев В. А., Сергеев Д. С., Колесников Ю. А. Возможности использования мелкодисперсных, железосодержащих отходов металлургии // *Литейные процессы*. 2014. № 13. С. 35–39.
111. Orhan G. Leaching and cementation of heavy metals from electric arc furnace dust in alkaline medium // *Hydrometallurgy*. 2005. Vol. 78. Iss. 3-4. P. 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.03.002>.
112. Zhang Duchao, Zhang Xinwang, Yang Tianzu, Rao Shuai, Hu Wei, Liu Weifeng, et al. Selective leaching of zinc from blast furnace dust with mono-ligand and mixed-ligand complex leaching systems // *Hydrometallurgy*. 2017. Vol. 169. P. 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.02.003>.
113. Halli P., Hamuyuni J., Leikola M., Lundström M. Developing a sustainable solution for recycling electric arc furnace dust via organic acid leaching // *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 124. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.011>.
114. Фидаров Б. Ф., Петров Г. В. Ферритсодержащие техногенные отходы металлургических производств // Неделя науки СПбПУ: матер. Науч. конф. с междунар. участием Института металлургии, машиностроения и транспорта (г. Санкт-Петербург, 14–19 ноября 2016 г.). СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2016. С. 125–128.
115. Tang Mo-tang, Zhang Peng, He Jing, Yuan Xia, Chen Yong-ming. Leaching zinc dust in system of Zn(II)-(NH₄)₂SO₄-H₂O // *Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2007. Vol. 38. No. 5. P. 867–872.
116. Wang Hui-gang, Jia Nannan, Liu Wenwu, Zhang Mei, Guo Min. Efficient and selective hydrothermal extraction of zinc from zinc-containing electric arc furnace dust using a novel bifunctional agent // *Hydrometallurgy*. 2016. Vol. 16. P. 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.10.013>.
117. Chen Dong, Sharma S. K., Mudhoo A. Handbook on applications of ultrasound: sonochemistry for sustainability. New York: CRC Press, 2012. 744 p.
118. Попов А. А., Петров Г. В. Утилизация цинксодеждающей пыли сталеплавильных производств // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 4. С. 177–185. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-4-177-185>.
119. Steer J. M., Griffiths A. J. Investigation of carboxylic acids and non-aqueous solvents for the selective leaching of zinc from blast furnace dust slurry // *Hydrometallurgy*. 2013. Vol. 140. P. 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.08.011>.
120. Dutrizac J. E. Zinc and lead processing // 37th Annual Conference of Metallurgists of CIM: Proceedings of an International Symposium (Calgary, 16–19 August 1998). Calgary: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 1998. P. 886.
121. Diaz G., Martin D. Modified Zincex process: the clean, safe and profitable solution to the zinc secondaries treatment // *Resources, Conservation and Recycling*. 1994. Vol. 10. Iss. 1-2. P. 43–57. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(94\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0921-3449(94)90037-X).

122. Wu Min, Nakano M., She Jin-Hua. A model-based expert control system for the leaching process in zinc hydrometallurgy // *Expert Systems with Applications*. 1999. Vol. 16. Iss. 2. P. 135–143. [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(98\)00062-1](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(98)00062-1).
123. Kusik C. L., Meissner H. P. Calculating activity coefficients in hydrometallurgy – a review // *International Journal of Mineral Processing*. 1975. Vol. 2. Iss. 2. P. 105–115. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(75\)90015-0](https://doi.org/10.1016/0301-7516(75)90015-0)
124. Halli P., Hamuyuni J., Revitzer H., Lundström M. Selection of leaching media for metal dissolution from electric arc furnace dust // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 164. P. 265–276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.212>.
125. Nyirenda R. L. The processing of steelmaking flue-dust: a review // *Minerals Engineering*. 1991. Vol 4. Iss. 7-11. P. 1003–1025. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90080-F](https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90080-F)
126. Niubó M., Fernández A. I., Chimenos J. M., Haurie L. A possible recycling method for high grade steels EAFD in polymer composites // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 171. No. 1-3. P. 1139–1144. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.126>.
127. Barreneche C., Fernández A. I., Niubó M., Chimenos J. M., Espiell F., Segarra M. et al. Development and characterization of new shape-stabilized phase change material (PCM) - Polymer including electrical arc furnace dust (EAFD), for acoustic and thermal comfort in buildings // *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 61. P. 210–214. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.026>
128. Nazari A., Shafyei A., Saidi A. Recycling of electric arc furnace dust into glass ceramic // *Materials Chemistry and Physics*. 2017. Vol. 205. P. 436–441. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.11.045>.
129. Cholake S. T., Farzana R., Numata T., Sahajwalla V. Transforming electric arc furnace waste into value added building products // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 171. P. 1128–1139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.084>.
130. Vargas A. S., Masuero A. B., Vilela A. C. F. Investigations on the use of electric-arc furnace dust (EAFD) in Pozzolan-modified Portland cement I (MP) pastes // *Cement and Concrete Research*. 2006. Vol. 36. No. 10. P. 1833–1841. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.06.003>
131. Machado A. T., Valenzuela-Díaz F. R., Souza C. A. C., Andrade Lima L. R. P. Structural ceramics made with clay and steel dust pollutants // *Applied Clay Science*. 2011. Vol. 51. Iss. 4. P. 503–506. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.01.004>.
132. Ledesma E. F., Lozano-Lunar A., Ayuso J., Galvín A. P., Fernández J. M., Jiménez J. R. The role of pH on leaching of heavy metals and chlorides from electric arc furnace dust in cement-based mortars // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 183. P. 365–375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.175>
133. Silva Magalhães M., Faleschini F., Pellegrino C., Brunelli K. Cementing efficiency of electric arc furnace dust in mortars // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 157. P. 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.074>.
134. Khattab R. M., El-Sayed Seleman M. M., Zawrah M. F. Assessment of electric arc furnace dust: powder characterization and its sinterability as ceramic product // *Ceramics International*. 2017. Vol. 43. Iss. 15. P. 12939–12947. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.192>
135. Артёмов А. В., Ружицкий А. О. Получение и использование дисперсных магнитных металлов в качестве катализаторов жидкофазных окислительных процессов [Электронный ресурс]. URL: <http://magneticliquid.narod.ru/authority/004.htm> (15.05.2021).
136. Свергузова С. В., Лашина О. Д. Использование пыли электросталеплавильных печей для очистки сточных вод от ионов никеля и меди // *Экология и промышленность России*. 2008. № 4. С. 46–47.
137. Свергузова С. В., Порожнюк Л. А., Ипанов Д. Ю., Шамшуров А. В., Новикова Е. В. Коллоидно-химические свойства пыли ЭДСП в процессах водочистки // *Экология и промышленность России*. 2013. № 7. С. 22–25.
138. Kukurugya F., Vindt T., Havlik T. Behavior of zinc, iron and calcium from electric arc furnace (EAF) dust in hydrometallurgical processing in sulfuric acid solutions: thermodynamic and kinetic aspects // *Hydrometallurgy*. 2015. Vol. 154. P. 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.03.008>.
139. Vereš J., Jakabský Š., Lovas M. Zinc recovery from iron and steel making wastes by conventional and microwave assisted leaching // *Acta Montanistica Slovaca*. 2011;16(3):185–191.

References

1. Leont'ev L. I., Dyubyanov V. G. Technogenic waste of ferrous and nonferrous metallurgy and environmental problems. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2011;4:32-35. (In Russ.).
2. Pereskoka V. V., Kamkina L. V., Projdak Y. S., Stovpchenko A. P., Kvichanska M. I. Reducing and thermal treatment of electric filter dust of electric arc furnace. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tehnicheskie nauki = Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*. 2010;21:13-16.
3. Shalimov A. G. Device for processing electric arc furnace dust. *Novosti chyornoj metallurgii za rubezhom*. 2001;1:47-48. (In Russ.).
4. Adon'ev S. M., Filip'ev O. V. *Dust and gas emissions from ferrous metallurgy enterprises*. Moscow: Metallurgiya; 1973, 200 p. (In Russ.).
5. Kiselev A. D., Tuluevskij Yu. N., Zinurov I. Yu. *Improving gas removal efficiency of arc steel-making furnaces*. Moscow: Metallurgiya; 1992, 112 p. (In Russ.).
6. Stovpchenko A. P., Kamkina L. V., Projdak Yu. S., Derevyanchenko I. V., Kucherenko O. L., Bondarenko M.

- Yu. *Theoretical and experimental studies of the composition and reducibility of dust in arc steel-making furnaces. Elektrometallurgiya*. 2009;8:29-36. (In Russ.).
7. Patrushov A. E., Nemchinova N. V., Chernykh V. E., Tyutrin A. A. Modern processing methods of technogenic raw materials of electric furnace steelmaking. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(4):183-190. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-183-190>.
8. Nemchinova N. V., Chernykh V. E., Tyutrin A. A., Patrushov A. E. Extraction of zinc and iron from electrosmelting dust. *Steel in Translation*. 2016;46(5):368-372. <https://doi.org/10.3103/S0967091216050090>.
9. Machado J. G. Characterization study of electric arc furnace dust phases. *Materials Research*. 2006;1:30-36. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>.
10. Machado J. G. M. S., Brehm F. A., Moraes C. A. M., dos Santos C. A., Vilela A. C. F., da Cunha J. B. M. Characterization study of electric arc furnace dust phases. *Materials Research*. 2006;136(3):953-960. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>.
11. Zunkel A. D. Recovering zinc and lead from electric arc furnace dust: a technology status report. In: Stewart DL Jr, Daley JC, Stephens RL (eds). *4th International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials*. Warrendale: Minerals, Metals & Materials Society; 2000, p. 227-236.
12. Coman V., Robotin B., Ilea P. Nickel recovery/removal from industrial wastes: a review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2013;73:229-238. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.019>.
13. Gajski G., Orešćanin V., Garaj-Vrhovac V. Chemical composition and genotoxicity assessment of sanitary landfill leachate from Rovinj, Croatia. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2012;78:253-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.11.032>.
14. Simonyan L. M., Hil'ko A. A., Lysenko A. A., Mihalchan A. A., Sel'nikova P. Yu. Electric steel-smelting dust as a dispersed system. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010;11:68-75. (In Russ.).
15. Rizescu C.-Z., Bacinschi Z., Stoian E.-V., Poinescu A.-A. Characterization of steel mill electric arc furnace dust. Available from: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2010/Tunisia/WWAI/WWAI-25.pdf> [Accessed 18th March 2021].
16. Nedin V. V., Nejkov O. D., Alekseev A. G., Krivcov V. A. *Explosion hazard of metal powders*. Kiev: Naukova dumka; 1971, 140 p.
17. Zaytsev A. K., Pokhvisnev Yu. V. Ecology and recycling in ferrous metallurgy. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal*. 2001;7(3):52-58. (In Russ.).
18. Chernousov P. I. *Technologies for ferrous metallurgy technogenic formations and waste processing and recycling*. Moscow: MISiS; 2011, 428 p. (In Russ.).
19. Doronin I. E., Svyazhin A. G. Industrial methods of steel-melting dust processing. *Metallurg*. 2010;10:48-53. (In Russ.).
20. Kozlov P. A., Zaton'skij A. V., Pan'shin A. M. Research and development of technology for removing impurities from Waelz-oxide obtained after processing of Zinc-containing dust from electric arc furnaces. In: *Innovacionnye razrabotki v gorno-metallurgicheskoy otrasli: materialy VI Mezhdunarodnoj konferencii: v ramkah IX Mezhdunarodnoj vystavki «MinTech-2011» = Innovative developments in the Mining and Metallurgical industry: proceedings of the VI International conference: within the framework of the IX International exhibition 'MinTech-2011'*. 19 May 2011, Ust'-Kamenogorsk. Ust'-Kamenogorsk: D. Serikbayev East Kazakhstan technical university; 2011, p. 189-193.
21. Kozlov P. A. *The Waelz process*. Moscow: Ruda i Metally; 2003, 160 p.
22. Gunter M., Vopel K.-H., Janssen W. Untersuchungen zur verwertung von stauben und schlammern aus den abgasreinigungen von hochofen- und blasstahlwerken im drehrohrofen. *Stahl und Eisen*. 1976;96(24):1228-1238.
23. Grudinskij P. I., Korneev V. P., Dyubanov V. G. Carbothermal recovery of electric steel melting dust with extraction of non-ferrous metals and iron. In: *V Mezhdunarodnaya konferenciya-shkola po himicheskoy tekhnologii: tezisy dokladov = The V International school-conference on chemical technology: report abstracts*. 16–20 May 2016, Volgograd. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2016, vol. 2, p. 171-172. (In Russ.).
24. Kozlov P. A., Povysheva E. V., Zolkina A. V., Vorobiev A. G. Modern situation and perspectives of Waelz-process usage for zinc extraction from dust of electric arc furnaces. *Tsvetnye metally*. 2009;7:36-40.
25. Panshin A., Kozlov P. Research and development of complex technology for zinc and indium recovery from oxidized raw material and waste utilization. In: *Lead-Zinc 2010: Proceedings of 49-th Annual Conference of Metallurgists*. 3–6 October 2010, Vancouver. Vancouver; 2010, p. 1255-1261.
26. Naimanbayev M. A., Lokhova N. G., Abisheva A. E., Malydybayev G. K., Barkytova B. N. Effect of some conditions of charge preparation on zinc distillation from oxidized ore. *Complex Use of Mineral Resources*. 2017;1:40-46.
27. Kotenev V. I., Barsukova E. Yu. Briquettes from fine waste of metallurgical and coke-chemical production as an economically profitable replacement of the traditional charge of metallurgical processing. *Metallurg*. 2002;10:42-45. (In Russ.).
28. Babanin V. I., Eremin A. Ya., Bezdezhskij G. N. Development and implementation of a new briquetting technology for fine-fraction materials with liquid glass. Part 1. *Metallurg*. 2007;1:68-71. (In Russ.).
29. Bystrov V. A., Novikov N. I. Innovations as a way to improve the competitiveness of metallurgical enterprises. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta = Vestnik of Kemerovo State University of Culture and Arts*. 2010;1:47-53. (In Russ.).
30. Letimin V. N., Nasyrov T. M., Makarova I. V. Evaluation of pyrometallurgical dezincing methods of dust and sludge from steel-making shops. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2013;1(13):67-70. (In Russ.).
31. Ivanica S. I., Loginovskih S. I., Mal'cev V. A., Melamud S. A., Mokrecov A. V., Hramov D. Yu. *Method for electric*

furnace dust disposal. Patent RF, no. 2484153; 2013. (In Russ.).

32. Dyubanov V. G., Zatonskiy A. V., Kozlov P. A., Leont'ev L. I., Pan'shin A. M., Reshetnikov Yu. V. *Processing method of zinc-containing metallurgical waste*. Patent RF, no. 2507280; 2017. (In Russ.).

33. Najmanbaev M. A., Lohova N. G., Baltabekova Zh. A., Barkytova B. N. On processing possibility of zinc-containing dust from the West Siberian Metallurgical Plant and Severstal with the ore from the Shaimerden deposit. In: *Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki processov pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy: trudy III Kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i Konferencii molodykh uchenykh V Forum "Ural'skiy rynek loma, promyshlennykh i kommunal'nykh othodov"* = *Fundamental research and applied development of processing and disposal of technogenic formations: Proceedings of the III Congress with international participation and the Conference of young scientists of the V Forum 'Ural market of scrap, industrial and municipal waste'*. 5–9 June 2017, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, p. 178-182. (In Russ.).

34. Kim V. A., Torgovets A. K., Dzhundibaev M. K., Kudarinov S. K., Bogoyavlenskaya O. A., Nurmuhambetov Zh. U. Obtaining low-phosphorus special coke for electrothermal production from non-caking coals of the Shubarkol deposit. In: *Povyshenie tekhnicheskogo urovnya gorno-metallurgicheskikh predpriyatij na osnove innovatsionnykh tekhnologiy: materialy VII Mezhdunarodnoy konferencii = Improving the technical level of mining and metallurgical enterprises based on innovative technologies: materials of the VII International conference*. 2013, Ust'-Kamenogorsk. Ust'-Kamenogorsk; 2013, p. 296-298.

35. Smirnov L. A. Development of a comprehensive scheme for the disposal of iron-containing waste. *Stal'*. 2001;1:89-90. (In Russ.).

36. Ul'yanov V. P., Bulavin V. I., Ul'yanova I. V., Artamonov A. P. Economic evaluation of the technological process of complex processing of dust and sludge of metallurgical redistributions with receipt of prerduced pellets. *Integrovani tekhnologii ta energoberezhenniya*. 2013;1:91-96.

37. Kim V. A., Trebuhova T. A., Kim S. V., Bivojno D. G. New carbon reductant carbonizate rexil for iron-containing raw material metallization. *Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki processov pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy, V Forum "Ural'skiy rynek loma, promyshlennykh i kommunal'nykh othodov": trudy Kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i Konferencii molodykh uchenykh = Fundamental research and applied development of processing and disposal of technogenic formations, the V Forum 'Ural market of scrap, industrial and municipal waste': proceedings of the Congress with international participation and the Conference of Young Scientists*. 5–9 June 2017, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, p. 212-214. (In Russ.).

38. Panshin A. M., Shakirzyanov R. M., Izbekht P. A., Zatonskiy A. V. Basic ways of improvement of zinc production at JSC Chelyabinsk Zinc Plant. *Tsvetnye Metally*. 2015;5:19-21. <https://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.03>.

39. Panshin A. M., Kozlov P. A., Shakirzyanov R. M., Zatonskiy A. V., Kongoli Flogen F. Development and implementation of a new technology for recycling of metallurgical wastes with the recovery of zinc, lead, tin and iron. In: *Shechtman International Symposium: 2014 Sustainable Industrial Processing*. 2014;4:309-315. <https://doi.org/10.13140/2.1.1602.0800>.

40. Shalimov A. G. Recycling of ferrous metallurgy waste. *Novosti chernoy metallurgii za rubezhom*. 2000;3:53-55. (In Russ.).

41. Demin A. V., Rozhkov A. I., Grudnickij O. M., Nikolaev V. V., Feklistov A. V. Finding ways of recycling dust of arc steel furnaces at the Belarusian metallurgic plant. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*. 2015;3:76-80.

42. Kashirina A. O., Rostovskiy V. I. Disposal of zinc-containing steel-smelting dust and sludge. In: *Ohrana okruzhayushchej sredy i racional'noe ispol'zovanie prirodnnykh resursov: V Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya aspirantov i studentov = Environmental protection and rational use of natural resources: the V International scientific conference of postgraduates and students*. 11–13 April 2006, Donetsk. Donetsk: DonNTU; 2006, vol. 1, p. 58-59.

43. Chacrabarti A. K. *Steel making*. New Delhi: PHI Learning Private Limited; 2012, 240 p.

44. Lopukhov G. A. Obtaining dust of better quality in arc furnaces by the companies Krupp and DDS. *Novosti chernoy metallurgii za rubezhom*. 1997;2:59-63. (In Russ.).

45. Rozhkov A. I., Ermakova E. V. Finding ways of recycling dust of arc steel furnaces at the Belarusian metallurgic plant. Part 3. Experiments on briquetting of dust of arc steel furnaces. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*. 2015;(4):93-97. (In Russ.).

46. Vishkarev A. F. Recycling of dust and sludge in converter shops. *Novosti chernoy metallurgii za rubezhom*. 1996;3:70-72. (In Russ.).

47. Godanskij N. A. Experience of using iron-carbon-containing briquettes in steel production. *Metallurg*. 2003;1:43-45. (In Russ.).

48. Odegov S. Yu., Fedosov I. B., Baranov A. P., Chernykh V. E., Patrushov A. E. *Method of metallurgical production waste processing*. Patent RF, no. 21; 2017. (In Russ.).

49. Yakornov S. A., Pan'shin A. M., Kozlov P. A., Ivakin D. A. Current state of electric arc furnace dust processing in Russia and abroad. In: *Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki processov pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy, V Forum "Ural'skiy rynek loma, promyshlennykh i kommunal'nykh othodov": trudy III Kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i Konferencii molodykh uchenykh = Fundamental research and applied development of processing and disposal of technogenic formations, the V Forum 'Ural market for scrap, industrial and municipal waste': proceedings of the III Congress with international participation and the Conference of Young Scientists*. 5–9 June 2017, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, p. 64-69. (In Russ.).

50. Kikuchi S., Ito S., Kobayashi I., Tsuge O., Tokuda K.

- ITmk3® process. *Kobelco technology review*. 2010;29:77-84.
51. Kobayashi I., Tanigaki Y., Liagami A. A new process to produce iron directly from fine ore and coal. *Iron and Steelmaker*. 2001;9:19-22.
52. Dubrovsky V. A., Starikov A. I., Panishev N. V., Redin E. V., Knyazev E. V. Direct reduction of TI-V magnetite via ITmk3 technology. In: *4th International symposium on high-temperature metallurgical processing*. 3–7 March 2013, San Antonio. San Antonio; 2013, p. 45-48.
53. Dubrovskij B. A., Shilyaev P. V., Redin E. V. Metallization of spar iron ore from the Bakalskoye deposit with the production of granular cast iron. In: *Energoberegayushchie tekhnologii v promyshlennosti. Pechnye agregaty. Ekologiya: sbornik trudov VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 80-letiyu MMK = Energy saving technologies in industry. Furnace units. Ecology: Collected works of the VI International scientific and practical Conference dedicated to the 80th anniversary of Magnitogorsk Iron and Steel Works*. 15–20 October 2012, Moscow. Moscow: 2012, p. 178-182. (In Russ.).
54. Yunes R., Opryshko I. A., Loboda P. I. Analysis of technologies for metal oxide direct reduction using rotary hearth furnaces. *Vestnik Nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy 'Kievskij politekhnicheskij institut'*. 2011;61:184-192.
55. Gordon Y., Els J. ITmk3 technology and its application for mining and steel industry in Ukraine and Russia. In: *International Conference on Ironmaking Technology*. 21 March 2007, Kyiv. Kyiv; 2007, p. 128-131.
56. Tanaka H., Miyagawa K., Harada T. FASTMET, FASTMELT and ITmk3: development of new coal-based ironmaking processes. *RHF Technologies*. 2011;5:15-19.
57. Panishev N. V., Bigeev V. A., Chernyaev A. A. Fine-grained metallurgical wastes recycling for iron pellets production and zinc extraction. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G.I. Nosova = Vestnik of Magnitogorsk State Technical University*. 2013;4:26-29.
58. Clelland J. M., Metius G. E. Recycling ferrous and nonferrous waste streams with fastmet. *Journal of the minerals, metals and materials Society*. 2003;8:30-34.
59. Tsutsumi H., Yoshida S., Tetsumoto M. Features of FASTMET® Process. *Kobelco technology review*. 2010;29:85-92.
60. Baranov A. P., Fedosov I. B., Tlekhugov N. V. Industrial recycling prospects of zinc-containing dust from electrometallurgical production in Russia. *Metallurgiya-Intekhko-2014: sbornik dokladov i katalog uchastnikov VII Mezhdunarodnoj konferencii = Metallurgy-Intekhko-2014: collected reports and the catalog of participants of the VII International conference*. 25–26 March 2014, Moscow. Moscow: Intekhko LLC; 2014, p. 71-76. (In Russ.).
61. Baranov A. P. Environmental problems when processing zinc-containing dust of arc steel-making furnaces. *Ferrous Metallurgy. Chernaya metallurgiya. Bulletin' nauchno-tehnicheskoy informacii = Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2012;7:91-95. (In Russ.).
62. Daiga V. R., Home D. A. Production of crude zinc oxide from steel mill waste oxides using a rotary health furnace. In: Stewart D. L., Daley J. C., Stephens R. L. (eds.). *Recycling of Metals and Engineered Materials*. Warrendale: TMS; 2000, p. 361-368. <https://doi.org/10.1002/9781118788073.ch31>.
63. Money K. L., Hanewald R. H., Bleakney R. R. Processing steel wastes pyrometallurgically at Inmetco. In: Stewart D. L., Daley J. C., Stephens R. L. (eds.). *Recycling of Metals and Engineered Materials*. Warrendale: TMS; 2013, p. 28-35. <https://doi.org/10.1002/9781118788073.ch34>.
64. Pargeter J. K., Hanewald R. H., Dombrowski D. E. Operating experience at INMETCO and application of the process to the production of DRI. *Conservation & Recycling*. 1985;8(13):363-375. [https://doi.org/10.1016/0361-3658\(85\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0361-3658(85)90006-2).
65. Borlée J., Steyls D., Colin R., Munnix R., Economopoulos M. Comet: un procédé utilisant du charbon pour produire une éponge de fer de qualité à partir de minerai fin. *Revue de Métallurgie*. 1999;96(3):331-340. <https://doi.org/10.1051/metal/199996030331>.
66. Chatterjee A, Banshidhar P. *Metallurgy for steelmaking: production and use*. New Delhi: Allied Publishers LTD; 2001, 732 p.
67. Kovalev V. N. Technology of complex processing of zinc-containing dust and sludge with resulting metallic rough zinc and iron. *Stal'*. 2013;2:72-76. (In Russ.).
68. Kologriev K. A. Dezincification of sludge and dust during agglomeration under pressure. In: *Mezhdunarodnyj simpozium, posvyashchennyy probleme kompleksnoj pererabotki tekhnogennyh othodov metallurgicheskogo proizvodstva = International symposium dedicated to the problem of complex processing of industrial waste from metallurgical production*. 8 October 2009, Moscow. Moscow: Central Research Institute of Ferrous Metallurgy named after I.P. Bardin; 2009, p. 49-52. (In Russ.).
69. Schoukens A. F., Denton G. M., Jones R. T. Pilot-plant production of Prime Western grade zinc from lead blast-furnace slag using the Enviroplas process. In: *Recycling of Metals and Engineered Materials, Third International Symposium: Third International Symposium*. November 1995, Point Clear, Alabama. Point Clear, Alabama; 1995, p. 857-868.
70. Leont'ev V. G. High-intensity processing of zinc-containing man-made waste by melting in a self-foaming oxide bath. *Mezhdunarodnyj simpozium, posvyashchennyy probleme kompleksnoj pererabotki tekhnogennyh othodov metallurgicheskogo proizvodstva = International symposium dedicated to the problem of complex processing of industrial waste from metallurgical production*. 8 October 2009, Moscow. Moscow: Central Research Institute of Ferrous Metallurgy named after I.P. Bardin; 2009, p. 62-65.
71. Mel'nichenko I. A., Kurenkov D. S., Lipina A. V. Zinc leaching from the dust of steel production sludge dumps of mining and metallurgical complex enterprises with subsequent electrolysis. *Sovremennye tekhnologii v oblasti proizvodstva i obrabotki cvetnyh metallov: materialy XII Nauchno-prakticheskoy konferencii = Modern technologies*

in the field of production and processing of non-ferrous metals: materials of the XII scientific and practical conference. 12 November 2015, Moscow. Moscow: VNIIMET-MASh; 2016, p. 372-378. (In Russ.).

72. Tarasov A. V., Besser A. D., Mal'cev V. I. *Metallurgical processing of secondary zinc raw materials*. Moscow: Gincvetmet; 2004, 219 p. (In Russ.).

73. Johansson L.-G. CONTOP now at MEFOS. *Newsletter from MEFOS – the foundation for metallurgical research*. 2010;1:2-5.

74. Both I., Houbart M., Roth J.-L. Advanced technologies for residue treatment – successful start-up of the PRIMUS® plant of Dragon Steel in Taiwan. In: *Iron & Steel technology conference: British Library Conference Proceedings*. 2010, Pittsburgh. Pittsburgh; 2010, p. 209-216.

75. Loshkarev A. N., Matyunina E. V. Implementation of the PRIMUS process in DSP-80 of the JSC Metallurgical plant named after A.K. Serov. In: *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve: sbornik dokladov IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchyonih «Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve» (TIM'2015) s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchyonnoy 95-letiyu osnovaniya kafedry i universiteta = Heat engineering and informatics in education, science and production: collected reports of the IV All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists 'Heat engineering and informatics in education, science and production' (TIM'2015) with international participation dedicated to the 95th anniversary of the foundation of the department and the university*. 26–27 March 2015, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; 2015, p. 93-95. (In Russ.).

76. Bratina J. E., Lenti K. M. PIZO furnace demonstration operation for processing EAF dust. *Iron & Steel Technology*. 2007; 4:118-122.

77. Holtzer M., Kmita A., Roczniak A. The recycling of materials containing iron and zinc in the oxycup process. *Archives of Foundry Engineering*. 2015;15(1):126-130.

78. Fleischanderl A., Gennari U., Ilie A. ZEWA – metallurgical process for treatment of residues from steel industry and other industrial sectors to generate valuable products. *Ironmaking & Steelmaking*. 2004;6:444-449. <https://doi.org/10.1179/irs.2004.31.6.444>.

79. Schoukens A. F. S., Nelson L. R., Barcza N. A. Plasma-arc treatment of steel-plant dust and zinc-containing slag – theoretical and practical considerations. In: *Recycling of lead and zinc the Challenge of the 1990s: Proceedings of the International Conference*. 11–13 June 1991, Rome. Rome; 1991, p. 361-370.

80. Arhipova L. V., Fedorov A. N. Zinc leaching from steel-making production dust using NaOH. In: Rahutin M. G., Voznesenskij A. S., Didenko S. I., Kuznecov D. V., Petrovskij P. V., Alpatov A. V. (eds.). *70-e Dni Nauki studentov NITU «MISiS» = 70th Days of Science of NUST MISiS students: collection of articles*. Moscow: Moscow Institute of Steel and Alloys; 2015, p. 93-95. (In Russ.).

81. Barcza N. A., Robertson D. G. C., Schoukens A. F. S., Shaw F., Denton G. M., Worcester T. W., Bailey D. J. En-

viroplas technology for the recovery of lead and zinc from lead blast-furnace slags. In: *Recycling Lead and Zinc into the 21st Century: Proceedings of the 6th International Conference*. 18–23 June 1995, Madrid. Madrid: International Lead and Zinc Study Group; 1995, p. 296-312.

82. Seregin P. S., Popov V. A., Tsemekhman L. Sh. New methods of processing of materials containing zinc, tin and lead. *Tsvetnye metally*. 2010;10:27-33. (In Russ.).

83. Blinkova E. V., Eliseev E. I. Kinetics of zinc oxide dissolution in aqueous solutions of acetic acid. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2005;5:8-10. (In Russ.).

84. Havlik T., Souza B. V., Bernardes A. M., Schneider I. A. H., Mišková A. Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2006;135(1-3):311-318.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.067>.

85. Havlik T., Turzakova M., Stopić S., Friedrich B. Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid. *Hydrometallurgy*. 2005;77(1):41-50. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.10.008>.

86. Yoshida T. Leaching of zinc oxide in acidic solution. *Materials Transactions*. 2003;44(12):2489-2493. <https://doi.org/10.2320/matertrans.44.2489>.

87. Özverdi A., Erdem M. Environmental risk assessment and stabilization/solidification of zinc extraction residue: I. Environmental risk assessment. *Hydrometallurgy*. 2010;100(3-4):103-109.

<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.10.011>.

88. Ye Guozhu, White J. F., Wei L. Y. Association of halogens in electric arc furnace dust and zinc oxide fume before and after leaching. In: *Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology (REWAS 1999): Proceedings Extraction and Process Metallurgy Meeting*. 5–9 September 1999, San Sebastián. San Sebastián; 1999, p. 1503-1510.

89. Cruells M., Roca A., Núnéz C. Electric arc furnace flue dusts: characterization and leaching with sulphuric acid. *Hydrometallurgy*. 1992;31(3):213-231.

[https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90119-K](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90119-K).

90. Yan Huan, Chai Li-yuan, Peng Bing, Li Mi, Peng Ning, Hou Dong-ke. A novel method to recover zinc and iron from zinc leaching residue. *Minerals Engineering*. 2014;55:103-110.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.09.015>.

91. Oustadakis P., Tsakiridis P. E., Katsiapi A., Agatzini-Leonardou S. Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD): part I: characterization and leaching by diluted sulphuric acid. *Journal of Hazardous Materials*. 2010;179(1-3):1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.059>.

92. Langová Š., Rípková J., Vallová S. Atmospheric leaching of steel-making wastes and the precipitation of goethite from the ferric sulphate solution. *Hydrometallurgy*. 2007;87(3-4):157-162.

<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.03.002>.

93. Tsakiridis P. E., Oustadakis P., Katsiapi A., Agatzini-Leonardou S. Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD). Part II: downstream processing and zinc recovery by electrowinning.

- Journal of Hazardous Materials*. 2010;179(1-3):8-14. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.004>.
94. Langová Š., Matýsek D. Zinc recovery from steel-making wastes by acid pressure leaching and hematite precipitation. *Hydrometallurgy*. 2010;101(3-4):171-173. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.003>.
 95. Xanthopoulos P., Agatzini-Leonardou S., Oustadakis P., Tsakiridis P. E. Zinc recovery from purified electric arc furnace dust leach liquors by chemical precipitation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2017;5(4):3550-3559. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.07.023>.
 96. Rao S. R. *Resource recovery and recycling from metallurgical wastes*. Montreal: Elsevier Science; 2006, 580 p.
 97. Van Weert G., Peek E. M. L. Reagent recovery in chloride hydrometallurgy – some missing links. *Hydrometallurgy*. 1992;29(1-3):513-526. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90030-4](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90030-4).
 98. Langová Š., Leško J., Matýsek D. Selective leaching of zinc from zinc ferrite with hydrochloric acid. *Hydrometallurgy*. 2009;95(3-4):179-182. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.040>.
 99. Jerzy G., Ostrowska P. Leaching of EAF dust with acidic solutions. In: *Ars Separatoria Acta 2005: Proceedings of the XXth International Symposium on Physico-Chemical Methods of the Mixtures Separation*. 20–23 June 2003, Szklarska. Szklarska Poręba; 2005.
 100. Katrenov B. B., Zhumashev K. Zh., Narembekova A. K., Musina A. E. Determination of optimal dezincification parameters for hydrochloric acid solution converter sludge. *Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki processov pererabotki i utilizacii tekhnogennykh obrazovaniy, V Forum «Ural'skij rynek loma, promyshlennykh i kommunal'nykh othodov»: trudy Kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i Konferencii molodykh uchennykh = Fundamental research and applied development of processing and disposal of technogenic formations of the V Forum 'Ural market of scrap, industrial and municipal waste': proceedings of the Congress with international participation and the Conference of young scientists*. 5–9 June 2017, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, p. 174-177. (In Russ.).
 101. Drinkard Jr. W. F., Woerner H. J. *Separation of calcium from metal compounds*. Patent US, no. 5.980.842; 1997.
 102. Vazarlis H. G. Hydrochloric acid-hydrogen peroxide leaching and metal recovery from a Greek zinc-lead bulk sulphide concentrate. *Hydrometallurgy*. 1987;19(2):243-251. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(87\)90008-9](https://doi.org/10.1016/0304-386X(87)90008-9).
 103. Barrett E. C., Nenniger E. H., Dziwinski J. A hydro-metallurgical process to treat carbon steel electric arc furnace dust. *Hydrometallurgy*. 1992;30(1-3):59-68. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90077-D](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90077-D).
 104. Leclerc N., Meux E., Lecuire J. M. Hydrometallurgical recovery of zinc and lead from electric arc furnace dust using mononitritoltriacetate anion and hexahydrated ferric chloride. *Journal of Hazardous Materials*. 2002;91(1-3):257-270. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00394-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00394-6).
 105. Youcai Zhao, Stanforth R. Integrated hydrometallurgical process for production of zinc from electric arc furnace dust in alkaline medium. *Journal of Hazardous Materials*. 2001;80(1-3):223-240. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00305-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00305-8).
 106. Li Qiang, Zhao Youcai, Jiang Jiachao, Zhang Chenglong. Optimized hydrometallurgical route to produce ultrafine zinc powder from industrial wastes in alkaline medium. *Procedia Environmental Sciences*. 2012;16:674-682. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.093>.
 107. Farnasov G. A., Kovalev V. I., Kurunov I. F., Bizhanov A. M., Vershinin I. N. *Selective extraction method of iron oxide and zinc oxide from sludge and dust of gas cleaning of metallurgical units*. Patent RF, no. 2617086; 2017. (In Russ.).
 108. Dutra A. J. B., Paiva P. R. P., Tavares L. M. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust. *Minerals Engineering*. 2006;19(5):478-485.
 109. Larba R., Boukerche I., Alane N., Habbache N., Djerad S., Tifouti L. Citric acid as an alternative lixiviant for zinc oxide dissolution. *Hydrometallurgy*. 2013;134-135:117-123. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.02.002>.
 110. Bigeev V. A., Sergeev D. S., Kolesnikov Yu. A. Application possibilities of fine, iron-containing metallurgical wastes. *Litejnye processy*. 2014;13:35-39. (In Russ.).
 111. Orhan G. Leaching and cementation of heavy metals from electric arc furnace dust in alkaline medium. *Hydrometallurgy*. 2005;78(3-4):236-245. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.03.002>.
 112. Zhang Duchao, Zhang Xinwang, Yang Tianzu, Rao Shuai, Hu Wei, Liu Weifeng, et al. Selective leaching of zinc from blast furnace dust with mono-ligand and mixed-ligand complex leaching systems. *Hydrometallurgy*. 2017;169:219-228. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.02.003>.
 113. Halli P., Hamuyuni J., Leikola M., Lundström M. Developing a sustainable solution for recycling electric arc furnace dust via organic acid leaching. *Minerals Engineering*. 2018;124:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.011>.
 114. Fidarov B. F., Petrov G. V. Ferrite-containing technogenic waste of metallurgical production. In: *Nedelya nauki SPbPU: materialy Nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem Instituta metallurgii, mashinostroeniya i transporta = A Week of Science at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University: materials of the Scientific conference with international participation of the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport*. 14–19 November 2016, Saint-Petersburg. Saint-Petersburg: Polytechnic University; 2016, p. 125-128. (In Russ.).
 115. Tang Mo-tang, Zhang Peng, He Jing, Yuan Xia, Chen Yong-ming. Leaching zinc dust in system of Zn(II)-(NH₄)₂SO₄-H₂O. *Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2007;38(5):867-872.
 116. Wang Hui-gang, Jia Nannan, Liu Wenwu, Zhang Mei, Guo Min. Efficient and selective hydrothermal extraction of zinc from zinc-containing electric arc furnace dust using a novel bifunctional agent. *Hydrometallurgy*. 2016;16:107-112. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.10.013>.

117. Chen Dong, Sharma S. K., Mudhoo A. *Handbook on applications of ultrasound: sonochemistry for sustainability*. New York: CRC Press; 2012, 744 p.
118. Popov A. A., Petrov G. V. Disposal of steel industry zinc-containing dust. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;4:177-185. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-4-177-185>.
119. Steer J. M., Griffiths A. J. Investigation of carboxylic acids and non-aqueous solvents for the selective leaching of zinc from blast furnace dust slurry. *Hydrometallurgy*. 2013;140:34-41. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.08.011>.
120. Dutrizac J. E. Zinc and lead processing. In: *37th Annual Conference of Metallurgists of CIM: Proceedings of an International Symposium*. 16–19 August 1998, Calgary. Calgary: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum; 1998, p. 886.
121. Diaz G., Martin D. Modified Zincex process: the clean, safe and profitable solution to the zinc secondaries treatment. *Resources, Conservation and Recycling*. 1994;10(1-2):43-57. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(94\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0921-3449(94)90037-X).
122. Wu Min, Nakano M., She Jin-Hua. A model-based expert control system for the leaching process in zinc hydrometallurgy. *Expert Systems with Applications*. 1999;16(2):135-143. [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(98\)00062-1](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(98)00062-1).
123. Kusik C. L., Meissner H. P. Calculating activity coefficients in hydrometallurgy – a review. *International Journal of Mineral Processing*. 1975;2(2):105-115. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(75\)90015-0](https://doi.org/10.1016/0301-7516(75)90015-0).
124. Halli P., Hamuyuni J., Revitzer H., Lundström M. Selection of leaching media for metal dissolution from electric arc furnace dust. *Journal of Cleaner Production*. 2017;164:265-276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.212>.
125. Nyirenda R. L. The processing of steelmaking flue-dust: a review. *Minerals Engineering*. 1991;4(7-11):1003-1025. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90080-F](https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90080-F).
126. Niubó M., Fernández A. I., Chimenos J. M., Haurie L. A possible recycling method for high grade steels EAFD in polymer composites. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;171(1-3):1139-1144. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.126>.
127. Barreneche C., Fernández A. I., Niubó M., Chimenos J. M., Espiell F., Segarra M. et al. Development and characterization of new shape-stabilized phase change material (PCM) – polymer including electrical arc furnace dust (EAFD), for acoustic and thermal comfort in buildings. *Energy and Buildings*. 2013;61:210-214. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.026>.
128. Nazari A., Shafyei A., Saidi A. Recycling of electric arc furnace dust into glass ceramic. *Materials Chemistry and Physics*. 2017;205:436-441. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.11.045>.
129. Cholake S. T., Farzana R., Numata T., Sahajwalla V. Transforming electric arc furnace waste into value added building products. *Journal of Cleaner Production*. 2018;171:1128-1139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.084>.
130. Vargas A. S., Masuero A. B., Vilela A. C. F. Investigations on the use of electric-arc furnace dust (EAFD) in Pozzolan-modified Portland cement I (MP) pastes. *Cement and Concrete Research*. 2006;36(10):1833-1841. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.06.003>.
131. Machado A. T., Valenzuela-Diaz F. R., Souza C. A. C., Andrade Lima L. R. P. Structural ceramics made with clay and steel dust pollutants. *Applied Clay Science*. 2011;51(4):503-506. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.01.004>.
132. Ledesma E. F., Lozano-Lunar A., Ayuso J., Galvín A. P., Fernández J. M., Jiménez J. R. The role of pH on leaching of heavy metals and chlorides from electric arc furnace dust in cement-based mortars. *Construction and Building Materials*. 2018;183:365-375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.175>.
133. Silva Magalhães M., Faleschini F., Pellegrino C., Brunelli K. Cementing efficiency of electric arc furnace dust in mortars. *Construction and Building Materials*. 2017;157:141-150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.074>.
134. Khatlab R. M., El-Sayed Seleman M. M., Zawrah M. F. Assessment of electric arc furnace dust: powder characterization and its sinterability as ceramic product. *Ceramics International*. 2017;43(15):12939-12947. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.192>.
135. Artyomov A. V., Ruzhickij A. O. Obtaining and using of dispersed magnetic metals as catalysts for liquid-phase oxidation processes. Available from: <http://magneticliquid.narod.ru/authority/004.htm>. [Accessed 15th May 2021]. (In Russ.).
136. Sverguzova S. V., Lashina O. D. Use of dust from electric arc steel-making furnaces for waste water cleaning from nickel and copper ions. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2008;4:46-47. (In Russ.).
137. Sverguzova S. V., Porozhnyuk L. A., Ipanov D. Yu., Shamshurov A. V., Novikova E. V. Colloidal-chemical properties of electric arc furnace dust in water treatment processes. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2013;7:22-25. (In Russ.).
138. Kukurugya F., Vindt T., Havlik T. Behavior of zinc, iron and calcium from electric arc furnace (EAF) dust in hydrometallurgical processing in sulfuric acid solutions: thermodynamic and kinetic aspects. *Hydrometallurgy*. 2015;154:20-32. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.03.008>.
139. Vereš J., Jakabský Š., Lovas M. Zinc recovery from iron and steel making wastes by conventional and microwave assisted leaching. *Acta Montanistica Slovaca*. 2011;16(3):185-191.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Топоркова Юлия Игоревна,
аспирант,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
620002, Свердловская обл., г. Екатеринбург,
ул. Мира, 19, Россия

Блудова Дана,
аспирант,
ассистент кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
620002, Свердловская обл., г. Екатеринбург,
ул. Мира, 19, Россия

Мамяченков Сергей Владимирович,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник,
заведующий кафедрой металлургии цветных
металлов,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
620002, Свердловская обл., г. Екатеринбург,
ул. Мира, 19, Россия

Анисимова Ольга Сергеевна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
620002, Свердловская обл., г. Екатеринбург,
ул. Мира, 19, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 04.09.2021; одобрена после рецензирования 11.10.2021; принята к публикации 27.10.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yulia I. Toporkova,
Postgraduate student,
Ural Federal University named after the First President of
Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia

Dana Bludova,
Postgraduate Student,
Assistant Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after the First President of
Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia

Sergey V. Mamyachenkov,
Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Head of the Department of Nonferrous Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after the First President of
Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia

Olga S. Anisimova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after the First President of
Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 04.09.2021; approved after reviewing 11.10.2021; accepted for publication 27.10.2021.