

Оригинальная статья

УДК 669.1:658.567.1

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-97-106

АКТУАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ ПЫЛЕЙ И ШЛАМОВ ДОМЕННОГО И СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВ

© 2024 г. И. В. Ноздрин¹, О. В. Коряковцева¹, О. А. Полях¹, А. Е. Аникин^{1, 2}

¹Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

²ООО «НК-Энерджи» (Россия, 654063, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Рудокопровая, 40, корп. 14)

Аннотация. Проведен сравнительный анализ процессов переработки цинксодержащих пылей и шламов доменных и сталеплавильных производств отечественных и зарубежных предприятий черной металлургии. Актуальность темы исследования определяется существенным увеличением в последнее десятилетие содержания цинка в мелкодисперсных возгонах сталеплавильного производства в связи с возросшим объемом переработки цинксодержащего лома и скрапа. Повышенное содержание цинка в металлургических возгонах не позволяет использовать их в качестве добавок к металлургической шихте из-за негативного влияния на ход плавки и плавильное оборудование. Как следствие, возникает необходимость вывоза и складирования большого количества ценного железо- и цинксодержащего техногенного сырья с существенными экономическими потерями и дополнительной экологической нагрузкой на окружающую среду. Выполнен анализ освоенных и перспективных технологических процессов извлечения цинка из мелкодисперсных отходов. Наибольшее внимания для совершенствования и тиражирования заслуживают процесс выделения технического оксида цинка при восстановительной плавке чугуна в электропечи (разработана сотрудниками НИТУ «МИСиС») и технология получения металлического цинка и железосодержащего концентрата, включающая предварительную высокотемпературную подготовку цинксодержащих шламов в трубчатой печи с последующим выщелачиванием клинкера и электролизом раствора (разработана негосударственным частным образовательным учреждением высшего образования «Технический университет УГМК» и опробована в условиях АО «Челябинский цинковый завод»). К существенным достоинствам последней технологической схемы следует отнести возможность реализации ее по модульному принципу и использование стандартного отечественного оборудования. Ориентировочные капитальные затраты на строительство модуля производительностью 100 000 т/год металлургических шламов составляют 993,5 млн рублей при сроке окупаемости около трех лет.

Ключевые слова: цинксодержащие шламы, феррит цинка, вельцевание, щелочное выщелачивание, электролиз цинка

Для цитирования: Ноздрин И.В., Коряковцева О.В., Полях О.А., Аникин А.Е. Актуализация методов переработки цинксодержащих пылей и шламов доменного и сталеплавильного производств. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):97–106. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-97-106](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-97-106)

Original article

UPDATING OF PROCESSING METHODS OF ZINC-CONTAINING DUST AND SLUDGE FROM BLAST FURNACE AND STEELMAKING PRODUCTION

© 2024 I. V. Nozdrin¹, O. V. Koryakovceva¹, O. A. Polyakh¹, A. E. Anikin^{1, 2}

¹**Siberian State Industrial University** (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

²**NK-Energy LLC** (40 Rudokoprovaya str., building 14, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654063, Russian Federation)

Abstract. The paper presents a comparative analysis of processing of zinc-containing dusts and sludge from blast furnace and steelmaking enterprises in domestic and foreign steel industry. The relevance of the research topic is determined by a significant increase in the zinc content in fine distillates of steelmaking in the last decade due to the increased volume of processing of zinc-containing scrap. The increased zinc content in metallurgical dust does not allow them to be used as additives to the metallurgical charge due to the negative effect on the melting process and melting equipment. As a result, it is necessary to withdraw and store a large amount of valuable iron and zinc-containing man-made raw materials with significant economic losses and additional environmental burden. The analysis of mastered and promising technological processes for the extraction of zinc from fine waste was performed. It seems that the process of isolation of technical zinc oxide during the reduction melting of cast iron in an electric furnace, developed by NUST “MISIS” employees, and a technology including preliminary high-temperature preparation of zinc-containing slurries in a tubular furnace followed by alkaline leaching of clinker and the release of metallic zinc and iron-containing concentrate, developed by the Non-state higher Educational Establishment “UMMC Technical University”, deserve the most attention for improvement and replication and tested in the conditions of Chelyabinsk Zinc Plant JSC. The significant advantages of the latest technological scheme include the possibility of implementing it according to the modular principle and using standard domestic equipment. The estimated capital costs for the construction of a module with a capacity of 100 000 tonnes per year of metallurgical sludge amount to 993.5 million rubles with a payback period of about 3 years.

Keywords: zinc-containing sludge, zinc ferrite, wetting, alkaline leaching, zinc electrolysis

For citation: Nozdrin I.V., Koryakovceva O.V., Polyakh O.A., Anikin A.E. Updating of processing methods of zinc-containing dust and sludge from blast furnace and steelmaking production. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):97–106. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-97-106](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-97-106)

Введение

Практически все металлургические процессы характеризуются образованием мелкодисперсных конденсированных фаз в виде пыли, уносимой из печной зоны отходящими газами. Природа образования пыли включает как механический унос мелкодисперсных частиц шихтовых материалов, так и конденсацию газообразных продуктов химических реакций, протекающих в высокотемпературных зонах печных агрегатов. В большинстве основных переделов черной металлургии количество образующейся пыли достигает 2 – 6 % от массы исходной шихты. В цветной металлургии количество пыли может достигать до 40 % от массы шихты (например, в процессах вельцевания). Большая часть газоочистных установок в металлургии работает по «мокрой схеме», что приводит к необходимости

строительства и содержания сложных и дорогих гидротехнических сооружений (шламоотстойников).

Масштабы металлургической отрасли приводят к необходимости колоссальных затрат на мероприятия обеспыливания отходящих газов и утилизации уловленных продуктов. Ужесточение природоохранного законодательства в части размещения и хранения промышленных отходов способствует стимулированию работ в этом направлении.

Аналитический обзор методов переработки цинксодержащих пылей и шламов

Для предприятий черной металлургии характерно высокое (до 70 %) содержание соединений железа в высокодисперсных отходах. Такие отходы следует отнести к ценному техногенно-

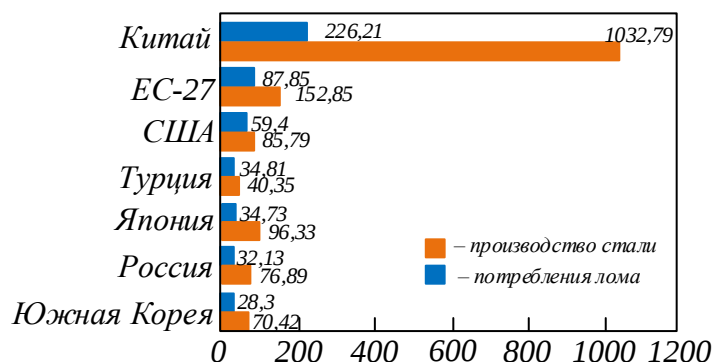


Рис. 1. Производство стали и потребление металлолома ведущими металлургическими странами [3]
Fig. 1. Steel production and scrap metal consumption by leading metallurgical countries [3]

му сырью, повторное использование которого существенно снижает стоимость готового металла. На практике, как правило, это реализуется при добавке обезвоженных шламов в шихту агломерации для экономии рудного сырья в доменной плавке. Технологическая возможность использования пыли и шламов, обеспечивающая экономическую эффективность подшихтовки таких материалов, определяется как их физическими свойствами, так и содержанием вредных примесей (цинка, свинца, кадмия, серы, щелочных металлов и др.) [1].

К наиболее вредным примесям следует отнести соединения цинка, особенно в связи с расширением использования оцинкованного скрапа в кислородно-конвертерном и электросталеплавильном производствах [2]. Физико-химические свойства цинка приводят к циклическому повышению его содержания в пыли. Низкая температура восстановления и испарения цинка обуславливают спекание шихты, нарушение гидродинамической обстановки в печи, снижение стойкости футеровки, что отрицательно влияет на технологические показатели доменной плавки и продолжительность кампании печи. В связи с этим технологические требования ограничивают содержание (не более 0,1 % (по массе)) цинка в аглошихте. Количество оборотных пыли и шламов не превышает 15 % от общего количества образующихся в процессах.

Проведя анализ структуры производства стали и потребления металлолома (рис. 1), следует отметить факт неизбежного роста доли оцинкованного лома в структуре сырья и, следовательно, в сопутствующих отходах металлургического производства, в связи с расширением применения технологии горячего оцинкования для защиты строительных металлоконструкций и автомобильного листа.

Показана структура потребления оцинкованного проката на рис. 2. В настоящее время около половины всего цинка направляется на произ-

водство оцинкованного проката (годовое производство около 13 млн т).

Следует отметить, что выход на максимальное содержание во вторичном сырье оцинкованного лома следует ожидать для экономически развитых стран в ближайшие годы с учетом сроков амортизации деталей и узлов оборудования и механизмов. В России такой пик следует ожидать примерно на 10 лет позже из-за более позднего внедрения технологий оцинкования. Этот факт позволяет сделать существенный технологический задел при разработке и внедрении оптимальных процессов переработки цинксодержащих отходов с учетом передового мирового опыта.

Учитывая, что Россия входит в число мировых лидеров по производству стали, а также тенденцию ужесточения природоохранного законодательства, следует отметить, что в ближайшие годы будет необходимость разработки и внедрения технологий утилизации цинксодержащих отходов металлургических производств (в первую очередь предприятий черной металлургии). Актуальность рассматриваемой тематики для Кемеровской обл. – Кузбасса очевидна из-за наличия на ее территории одного из крупнейших заводов металлургического холдинга АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»), а также накопленными разнообразными металлургическими отходами.



Рис. 2. Структура потребления оцинкованной стали [4]
Fig. 2. Structure of consumption of galvanized steel [4]

Над проблемами очистки металлургической пыли от цинка и ее утилизации работают во многих странах мира. Большинство зарубежных разработок в этом направлении было реализовано в конце 90-х – начале 2000-х годов. В качестве основных способов обесцинкования отходов использовались пиро- и гидрометаллургические процессы [5; 6]. Гравитационные методы извлечения цинка из мелкодисперсных конденсатов в отличие от переработки подобных отходов химических производств (например, предприятий по производству искусственного волокна) не нашли применения в связи со сложным физико-химическим составом цинксо-державших фаз. Отечественные разработки в этом направлении отстают примерно на два десятилетия, что определяется относительно мягким природоохранным законодательством в части платы за размещение цинксо-державших отходов. В связи с тенденцией ужесточения экологических требований наблюдается резко возросшая активность проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Следует отметить существенный прогресс в проведении научных и технологических работ для Магнитогорского, Новолипецкого и Череповецкого металлургических комбинатов. К аутсайдерам можно отнести предприятия компании АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

В связи с многообразием видов сырья и процессов его переработки невозможно создать универсальную технологию, удовлетворяющую всем технологическим, экономическим и экологическим требованиям. В настоящей работе сделана попытка выделения и актуализации наиболее оптимальных технологических процессов переработки цинксо-державшей металлургической пыли и шламов.

Наибольшее распространение получили пиро- и гидрометаллургические способы переработки цинксо-державших отходов. Следует отметить, что эффективность применяемых технологий определяется не столько технологическими приемами и конструкцией оборудования, а, в первую очередь, содержанием цинка во вторичном сырье. При содержании цинка в отходах менее 15 % невозможно добиться положительной рентабельности процесса [7]. Поэтому в качестве основополагающих требований к современным процессам переработки лома ставится сортировка их по наличию цинковых покрытий, обеспечивающих содержание цинка в пылях выше 20 %. Кроме того, на ряде зарубежных предприятий черной металлургии внедрены технологии термического [8; 9] или химического [10 – 12] обесцинковывания ломов перед переработкой.

К освоенным зарубежными технологиями можно отметить следующие наиболее перспективные: факельная плавка HPD; шахтные плавки Oxid Recycle и MF; переработка в печах с вращающейся подиной DRUIRON- и AllMet-процессы; AUSMELT и PLASMA-DUST-процессы; процесс Primus и Romelt процессы [6]. К наиболее интересным и перспективным для использования в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК» можно отнести следующие технологии: Primus- и Romelt-процессы; технологию получения цинкового порошка из металлургической пыли, разработанную негосударственным частным образовательным учреждением высшего образования «Технический университет УГМК» (НЧОУ ВО «ТУ УГМК»).

Primus-процесс был разработан и технологически освоен в первом десятилетии 2000-х годов на сталеплавильных предприятиях в Люксембурге и Тайване фирмой «Paul Wurth» [13]. Технология предназначена для переработки аспирационной и газоочистной пылей металлургических агрегатов с содержанием цинка и свинца более 5 %. Производительность разработанного процесса была доведена до 100 000 т/год пыли.

Технология Primus (рис. 3) является двухстадийной: на первой стадии использовали многопородную печь, предназначенную для сушки, нагрева и начального восстановления железа; на второй стадии применяли электродуговую печь с плавильным блоком Primus.

На первом этапе процесса организована термическая обработка смеси рудного сырья и пыли сталеплавильных печей в вертикальной шахтной многопородной обжиговой печи, обеспечивающей сушку и прокалку шихты, а также частичное восстановление и возгонку свинца и цинка. В качестве топлива используют низкосольные сорта углей. На втором этапе процесса термически обработанная шихта поступает на восстановительную плавку в дуговую электропечь для получения чугуна. Конденсированные возгоны в виде оксида цинка (с содержанием около 55 – 60 % Zn) улавливаются в пылегазовом тракте рукавными фильтрами и передаются на извлечение цинка по стандартной гидрометаллургической технологии. Достоинством рассматриваемой схемы является высокая степень извлечения цинка (до 96 %), а недостатком – большой расход электроэнергии с учетом последующих выщелачивания и электролиза цинка. В Кемеровской обл. – Кузбассе этим направлением занимались ООО «Кузбассэко» и ООО «НК-сталь» для решения вопросов утилизации шламов доменного производства. В настоящее время работы по этому направлению приостановлены.

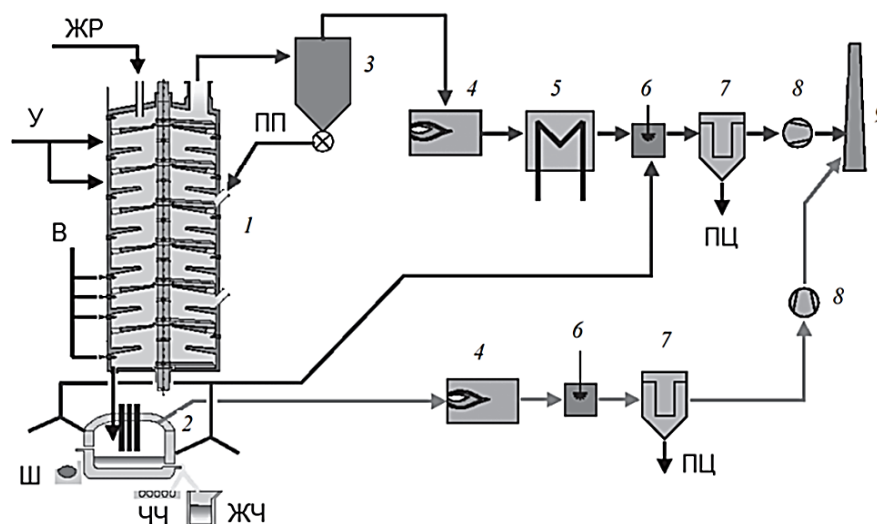


Рис. 3. Технологическая схема процесса Primus:

1 – многоподовая печь; 2 – электропечь; 3 – камеры дожигания газа; 4 – рекуператор-подогреватель воздуха горения; 5 – холодильники; 6 – тканевые фильтры; 7 – дымососы; 8 – дымовая труба; 9 – плавильный агрегат; ЖР – железная руда; У – уголь; В – воздух; Ш – шлак; ЧЧ – чушковый чугун; ЖЧ – жидкий чугун; ПГ – продукты горения; ТГ – технологический газ электропечи; АГ – аспирационные газы; ПП – пыль на рециклинг процесса Primus; ПЦ – пыль на производство цинка и свинца

Fig. 3. Technological scheme of the Primus process Gorenje:

1 – multi-furnace; 2 – electric furnace; 3 – gas afterburning chambers; 4 – recuperator-gorenje air heater; 5 – refrigerators; 6 – fabric filters; 7 – smoke pumps; 8 – chimney; 9 – melting unit; ЖР – iron ore; У – coal; В – air; Ш – slag; ЧЧ – pig iron; ЖЧ – liquid cast iron; ПГ – combustion products; ТГ – process gas of an electric furnace; АГ – aspiration gases; ПП – dust for recycling of the PRIMUS process; ПЦ – dust for the production of zinc and lead

Romelt-процесс был разработан сотрудниками НИТУ «МИСиС» [14]. Технология реализуется (рис. 4) в комбинированной отражательной плавильной печи для восстановления железосодержащего (в том числе вторичного) сырья в металло-шлаковых расплавах. В качестве восстановителя и топлива можно использовать различное углеродсодержащее сырье, в том числе угли энергетических сортов. Необходимое тепло для расплавления компонентов шихты, нагрева расплава до температуры 1500 – 1600 °С и протекания химических реакций генерируется за счет газификации угля в барбатированном нижнем слое расплава и дожигания оксида СО и водорода под сводом печи с подачей воздушного дутья в верхний ряд фурм. Образующийся чугун с содержанием углерода 4,0 – 4,8 % и шлак разделяются в «спокойной» зоне печи с последующим выпуском.

Легковосстановимые металлы (цинк, свинец и кадмий) практически полностью в виде паров «эвакуируются» в газовый тракт, где окисляются до оксидов и улавливаются в мокрой газоочистке. Содержание цинка в шлаках достигало 32,0 % при степени извлечения 99,8 %. Полученные шламы перерабатывают на металлический цинк по стандартной гидрометаллургической технологии.

Наиболее проработанной с учетом большого опыта изучения свойств и особенностей поведе-

ния вторичных цинксодержащих материалов является технология получения цинкового порошка из металлургической пыли, разработанная НЧОУ ВО «ТУ УГМК» и опробованная в условиях АО «Челябинский цинковый завод» [15 – 18].

Главной технологической проблемой переработки цинксодержащих отходов заводов черной металлургии является наличие значительного количества железа, которое образует с цинком весьма прочные ферриты. Приведены результаты аттестации химического и фазового составов образцов пыли сталеплавильного производства (рис. 5, табл. 1) [19; 20]. Цинк в образцах пыли содержится как в оксидной, так и в ферритной формах, что обуславливает необходимость предварительного разложения ферритов.

Предложенная схема включает стадию пирометаллургического разрушения ферритов с последующим селективным выщелачиванием цинка каустической содой и его электроэкстракцией с получением порошка.

В качестве основного технологического решения, способствующего разрушению ферритов цинка, предложена предварительная обработка шламов во вращающейся футерованной печи при температуре около 1000 °С в присутствии извести или известняка. Основным агрегатом предложено использовать стандартную вельц-

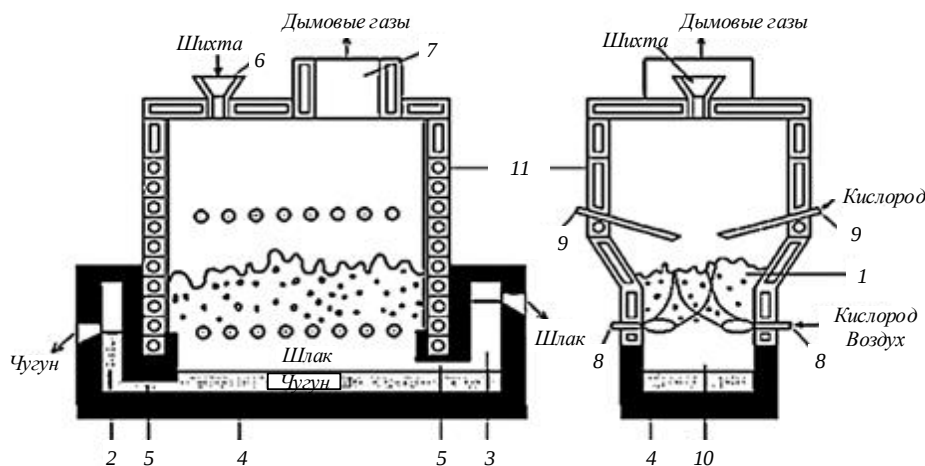


Рис. 4. Схема процесса Romelt:

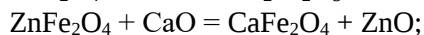
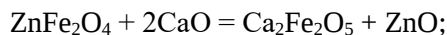
1 – барботируемый шлак; 2 – металлический отстойник; 3 – шлаковый отстойник; 4 – под печи с огнеупорной футеровкой; 5 – перегородки; 6 – загрузочная воронка; 7 – дымоотводящий патрубок; 8 – барботажные фурмы; 9 – фурмы для дожигания; 10 – спокойный шлак; 11 – водоохлаждаемые панели

Fig. 4. Scheme of the Romelt process:

1 – bubbled slag; 2 – metal sump; 3 – slag sump; 4 – for furnaces with refractory lining; 5 – overflows; 6 – loading funnel; 7 – exhaust pipe; 8 – bubbling tuyeres; 9 – afterburning tuyeres; 10 – calm slag; 11 – water-cooled panels

печь диаметром 2,8 м и длиной 41 м [21], в качестве топлива применяли коксовую мелочь.

Процесс разложения ферритов можно описать следующими уравнениями [9]:



После обработки шламов в вельц-печи цинковый клинкер подвергают выщелачиванию, цементационной очистке полученного раствора и выделению гранулятов цинка на катоде в электролизной ванне. Аппаратурно-технологическая схема процесса представлена на рис. 6.

Применение одной стандартной вельц-печи диаметром 2,8 м позволяет перерабатывать до

100 000 т пыли/год с получением около 16 000 т/год цинкового порошка. Полученный порошок предлагается использовать для цементационной очистки в различных гидрометаллургических процессах. Себестоимость цинкового порошка составила около 75 000 руб./т, что почти в два раза ниже себестоимости аналогичного материала в условиях действующего производства АО «Челябинский цинковый завод». Экономическая эффективность проекта позволит окупить затраты на производство в течение 1,5 – 2,7 года в зависимости от реализованной схемы [17].

Проведена оценка структуры затрат на реализацию подобного производства. Результаты расчета в текущих ценах представлены в табл. 2.

К основным достоинствам предлагаемого процесса можно отнести следующее:

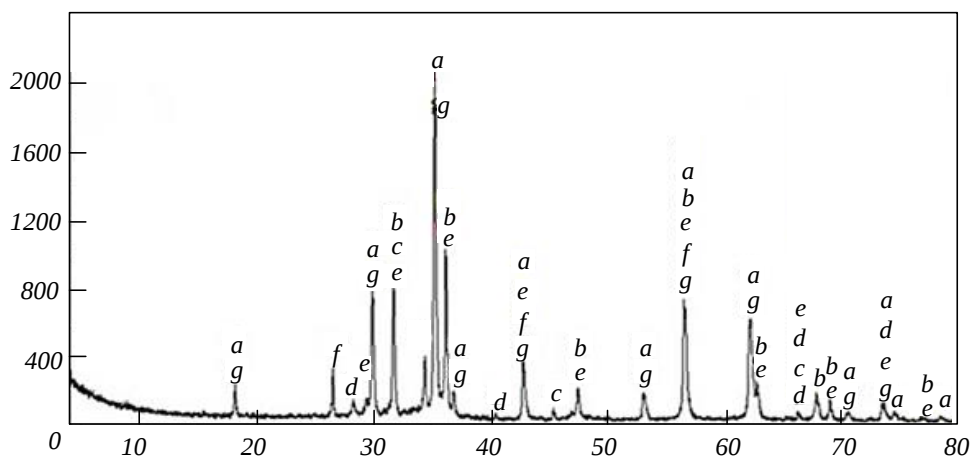


Рис. 5. Фазовый состав цинкосодержащей металлургической пыли (ДСП):

a – ZnFe_2O_4 ; b – ZnO ; c – NaCl ; d – KCl ; e – CaCO_3 ; f – C; g – Fe_3O_4

Fig. 5. Phase composition of zinc-containing metallurgical dust (chipboard):

a – ZnFe_2O_4 ; b – ZnO ; c – NaCl ; d – KCl ; e – CaCO_3 ; f – C; g – Fe_3O_4

Химический состав цинкосодержащей металлургической пыли
Table 1. Chemical composition of zinc-containing metallurgical dust

Соединения	Содержание, кг									
	Zn	Fe	Pb	Ca	K	Na	C	Cl	O ₂	Проч.
ZnO	9,86	–	–	–	–	–	–	–	2,4	–
ZnFe ₂ O ₄	1,60	20,00	–	–	–	–	–	–	11,4	–
Fe ₃ O ₄	–	15,00	–	–	–	–	–	–	5,7	–
NaCl	–	–	–	–	–	6,36	–	0,90	–	1,14
KCl	–	–	–	–	2,75	–	–	0,90	–	1,14
C	–	–	–	–	–	–	1,68	–	–	–
CaO	–	–	–	7,59	–	–	–	–	–	–
PbO	–	–	1,59	–	–	–	–	–	–	–
Итого, %	21,46	35	1,59	7,59	2,75	6,36	1,68	1,79	19,5	2,28
										100

– высокая степень извлечения цинка из железосодержащей пыли и шламов (более 90 %), обеспечивающая возможность повторного применения их в качестве вторичного металлургического сырья;

– относительно низкие капитальные затраты, стандартное недефицитное оборудование и возможность реализации технологии по модульному принципу;

– хорошие технологические перспективы при соответствующем уровне исследований переработки пылевидных материалов с содержанием цинка менее 20 %.

Выводы

В последние годы наблюдается рост содержания цинка в пылевидных отходах предприятий черной металлургии в связи с увеличением его содержания в ломах. С учетом значительно-го объема накопленных цинкосодержащих пыли и шламов черной металлургии и ужесточения

природоохранного законодательства решение вопросов их утилизации выходит на первый план. Для успешной переработки вторичного мелкодисперсного сырья необходимо решить вопросы повышения концентрации в нем цинка. Это влечет необходимость организации процессов предварительной сортировки ломов перед плавкой, а также внедрения процессов термического или химического удаления цинка. Из рассматриваемых процессов наиболее интересной представляется технология утилизации цинка, разработанная негосударственным частным образовательным учреждением высшего образования «Технический университет УГМК» и опробованная в условиях АО «Челябинский цинковый завод». Эта схема может быть реализована по модульному принципу с переработкой около 100 000 т/год металлургических шламов. Ориентировочные капитальные затраты на внедрение такого модуля составляют 993,5 млн рублей.

Инвестиции в передел извлечения цинка из пыли сталеплавильного производства (20 % Zn)
Table 1. Investments in the conversion of zinc extraction from particle board dusts and converters (20 % Zn)

Производительность, т/год	Срок строительства, лет	Инвестиции (млн руб.)					
		Инжиниринг	Оборудование	Строительные работы	Монтажные работы	Оборотные средства	Всего
100 000	2	46,02	508,00	364,1	65,43	10,00	993,50

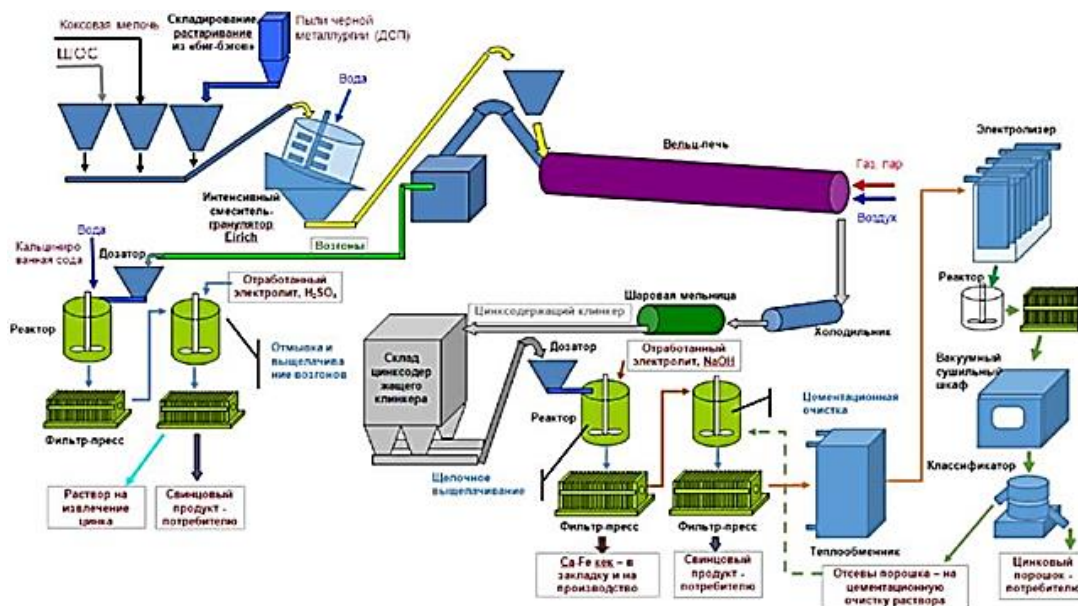


Рис. 6. Аппаратурно-технологическая схема одностадийного вальцевания металлургических шламов с получением цинкового порошка [15]

Fig. 6. Hardware and technological scheme of single-stage welding of metallurgical sludge to produce zinc powder [15]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов А.В. *Производство цветных металлов и сплавов. Т. 3. Вторичная металлургия тяжелых цветных металлов.* Москва: «Академкнига». 2008:207–219.
2. Stuart C. Global Symposium of Recycling Waste Treatment and Clean Technology. *REWAS' 99: TMS and Inasmelt.* Warrendale. 1999;II:1287–1289.
3. *Производство стали и потребление металлолома ведущими металлургическими странами в 2021 г.* – URL: <http://www.topic.ru/statistics/chemicals/mining-metals-and-minerals/proizvodstvo-stali-i-potreblenie-loma-na-vedushchikh-mirovykh-rynkhkh/?ysclid=1mt03bqrq165930006> (дата обращения: 09.01.2024).
4. *Ситуация на рынке оцинкованного проката / Металлургический бюллетень* – 21 сентября 2023 г. – URL: <https://www.metalbulletin.ru/a/6F?ysclid=1mt0qjkfyu590081709> (дата обращения: 09.01.2024).
5. *Principal Uses of Lead and Zinc:* ILZS;2003.
6. Тарасов А.В., Бессер А.Д., Мальцев В.И. *Металлургическая переработка вторичного цинкового сырья.* Москва: Гинцветмет. 2004:99–107.
7. Казанбаев Л.А., Козлов П.А., Кубасов В.Л., Колесников А.В. *Гидрометаллургия цинка. Гидрометаллургия цинка. Очистка растворов и электролиз.* Москва: ИД «Руда и металлы». 2006:8–17.
8. Okada Y., Takeuchi Y., Fujio S. Development of Method for Removal of Zinc from Automobile Body Scraps. In: *Galvatech '95 Conference Proceedings, ISS.* Pittsburgh, PA, USA. 1995:549.
9. Southwick L.M. Global Symposium on Recycling Waste Treatment and Clean Technology. *REWAS'99.* 1999;II:311–325.
10. Groult D., Marechale R., Klut P., Bonnema B.T.H. Recycling of Metals and Engineered Materials. *TMS.* 2000:201–209.
11. Van Rij P.W., Campenon B., Mooij J.N. *Dezincing of Steel Scrap.* *Iron and Steel Engineer.* 1997:32.
12. Southwick L.M. *Dezincing of Galvanized Steel – Latest Developments. Environmentally Friendly Lead and Zinc.* In: *The Challenge of the Recycling Millenium, Supplementary Volume, ILZSG's 7th International Recycling Conference.* London: The Chameleon Press Ltd.1998:87–96.
13. Hansmann T., Frieden R., Roth J.L. Recycling of EAF Dust and of the Other Zinc Bearing Residues with the PRIMUS-process. In: *Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economic Aspects.* Lulea University of Technology, MEFOS, TMS, Lulea, Sweden. 2002:405–414.
14. Romenets V., Pokhvisnev Yu., Valavin V., Vandariyev S., Zaytsev A. Romelt Process – New Technology for Industrial Wastes Recycling. *Proceedings EMC.* GDMB, Clausthal-Zellerfeld. 2001;2:25–39.
15. Ивакин Д.А., Решетников Ю.В., Ивакин Д.А. Разработка экологичной технологии переработки пылей электродуговых печей совместно с известковым шламом очистки

- сточных вод цинковых предприятий. *Цветные металлы*. 2015;5:71–75.
<http://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.14>
16. Якорнов Д.А., Паньшин А.М., Козлов П.А., Ивакин Д.А. Современное состояние переработки пылей электродуговых печей в России и за рубежом. В кн.: *Конгресс Техноген – 2017, научная конференция «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований», V Форум "Уральский Рынок Лома, Промышленных И Коммунальных Отходов»*. Екатеринбург, 05-09 июня 2017 года. Екатеринбург: ИМЕТ УрО РАН. 2017:64–70. EDN: YTDTHXV.
 17. Козлов П.А., Якорнов С.А., Паньшин А.М., Ивакин Д.А. Разработка и внедрение технологии получения цинкового порошка из цинксодержащих пылей черной металлургии. *Цветные металлы*. 2020;5(929):6–11.
 18. 18 Пат. 2732817 РФ С1. Способ переработки пылей электродуговых печей / П.А. Козлов, С.А. Якорнов, А.М. Паньшин и др.; завл. 23.12.2019; опубл. 22.09.2020.
 19. Kozlov P.A., Zatonsky A.V., Panshin A.M., Research and Development of Technogenic Wastes Recycling with Recovery of Zinc, Lead and Tin EMC-2015, Pb–Zn. *Dusseldorf*. 2015:965–975.
 20. Грудинский П.И., Корнеев В.П., Дюбанов В.Г., Козлов П.А., Леонтьев Л.И. Пыль электродуговой печи – перспективный материал для производства цветных металлов и чугуна. *Перспективные материалы*. 2016;10:69–75. EDN:WNEQJP.
 21. Козлов П.А. *Вельц-процесс*. Москва: ИД «Руда и металлы». 2002:175.
 4. The situation on the galvanized steel market / *Metallurgical Bulletin* – September 21, 2023. – URL: <https://www.metalbulletin.ru/a/6F?ysclid=lm0qjkfyu590081709> (Accessed: 09.01.2024). (In Russ.).
 5. *Principal Uses of Lead and Zinc*: ILZS. - 2003.
 6. Tarasov A.V., Besser A.D., Mal'tsev V.I. *Metallurgical processing of secondary zinc raw materials*. Moscow: Gintsvetmet. 2004:99–107. (In Russ.).
 7. Kazanbaev L.A., Kozlov P.A., Kubasov V.L., Kolesnikov A.V. *Hydrometallurgy of zinc. Hydrometallurgy of zinc. Purification of solutions and electrolysis*. Moscow: Izdatel'skii dom «Ruda i metally». 2006:8–17. (In Russ.).
 8. Okada Y., Takeuchi Y., Fujio S. Development of Method for Removal of Zinc from Automobile Body Scraps. In: *Galvatech '95 Conference Proceedings, ISS*. Pittsburgh, PA, USA. 1995:549.
 9. Southwick L.M. Global Symposium on Recycling Waste Treatment and Clean Technology. *REWAS'99*. 1999;II:311–325.
 10. Groult D., Marechale R., Klut P., Bonnema B.T.H. Recycling of Metals and Engineered Materials. *TMS*. 2000:201–209.
 11. Van Rij P.W., Campenon B., Mooij J.N. *Dezincing of Steel Scrap. Iron and Steel Engineer*. 1997:32.
 12. Southwick L.M. Dezincing of Galvanized Steel – Latest Developments. Environmentally Friendly Lead and Zinc: The Challenge of the Recycling Millennium, Supplementary Volume, ILZSG's 7th International Recycling Conference. London: The Chameleon Press Ltd. 1998:87–96.
 13. Hansmann T., Frieden R., Roth J.L. Recycling of EAF Dust and of the Other Zinc Bearing Residues with the PRIMUS-process. In: *Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economic Aspects*. Lulea University of Technology, MEFOS, TMS, Lulea, Sweden. 2002:405–414.
 14. Romenets V., Pokhvisnev Yu., Valavin V., Vandariyev S., Zaytsev A. Romelt Process – New Technology for Industrial Wastes Recycling. *Proceedings EMC. GDMB, Clausthal-Zellerfeld*. 2001;2:25–39.
 15. Ivakin D.A., Reshetnikov Yu.V., Ivakin D.A. Development of an environmentally friendly technology for processing electric arc furnace dusts in conjunction with lime sludge for wastewater treatment of zinc enterprises. *Tsvetnye metally*. 2015;5:71–75. (In Russ.).
<http://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.14>

REFERENCES

1. Tarasov A.V. *Production of non-ferrous metals and alloys. Vol. 3. Secondary metallurgy of heavy non-ferrous metals*. Moscow: «Akademkniga». 2008:207–219. (In Russ.).
2. Stuart C. Global Symposium of Recycling Waste Treatment and Clean Technology. *REWAS' 99: TMS and Inasmelt*. – Warrendale. 1999;II:1287–1289.
3. Steel production and scrap metal consumption by leading metallurgical countries in 2021. – URL: <http://www.topic.ru/statistics/chemicals/mining-metals-and-minerals/proizvodstvo-stali-i-potreblenie-loma-na-vedushchikh-mirovykh-rynках/?ysclid=lm03bzrqq165930006> (accessed: 09.01.2024). (In Russ.).

16. Yakornov D.A., Pan'shin A.M., Kozlov P.A., Ivakin D.A. The current state of processing of electric arc furnace dusts in Russia and abroad. In: *Technogen Congress - 2017, scientific conference "Fundamental research and applied developments of processes of processing and utilization of technogenic formations"*, V Forum "Ural Market of Scrap, Industrial and Municipal Waste". Yekaterinburg, 05-09 June 2017. Ekaterinburg: IMET UrO RAN. 2017:64–70. EDN: YTDTXB. (In Russ.).
17. Kozlov P.A., Yakornov S.A., Pan'shin A.M., Ivakin D.A. Development and implementation of technology for the production of zinc powder from zinc-containing dusts of ferrous metallurgy. *Tsvetnye metally*. 2020;5(929):6–11. (In Russ.).
18. Kozlov P.A., Yakornov S.A., Pan'shin A.M., etc. A method for processing electric arc furnace dusts. Pat. 2732817 RF C1. application 23.12.2019; publ. 22.09.2020; the applicant, the patent holder of the NCHOU VO "UMMC Technical University". 2020. (In Russ.).
19. Kozlov P.A., Zatonsky A.V., Panshin A.M., Research and Development of Technogenic Wastes Recycling with Recovery of Zinc, Lead and Tin EMC-2015, Pb-Zn. - 2015, June 14-17. Germany: Dusseldorf. 2015:965–975.
20. Grudinskii P.I., Korneev V.P., Dyubanov V.G., Kozlov P.A., Leont'ev L.I. Electric arc furnace dust is a promising material for the production of non-ferrous metals and cast iron. *Perspektivnye materialy*. 2016;10:69–75. EDN:WNEQJP. (In Russ.).
21. Kozlov P.A. *The Welz process*. Moscow: Izdatel'skii dom «Ruda i metally». 2002:175. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Игорь Викторович Ноздрин, д.т.н., доцент, профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: kafcmet@sibsiu.ru
SPIN-код: 5830-8911

Олеся Валерьевна Коряковцева, аспирант кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, заведующий лабораторией Центра «Геоэкологическая»

Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: koryakovceva76@inbox.ru

Ольга Анатольевна Полях, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

SPIN-код: 5525-0398

Александр Ефимович Аникин, заместитель директора по техническим вопросам, ООО «НК-Энерджи»

E-mail: anikin1985@rambler.ru

SPIN-код: 7641-5740

Information about the authors:

Igor' V. Nozdrin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

SPIN-код: 5830-8911

Olesya V. Koryakovtseva, Postgraduate student of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Head of the laboratory of the Center "Geoecology", Siberian State Industrial University

E-mail: koryakovceva76@inbox.ru

Ol'ga A. Polyakh, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

SPIN-код: 5525-0398

Aleksandr E. Anikin, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director for Technical Issues, of NK-Energy

E-mail: anikin1985@rambler.ru

SPIN-код: 7641-5740

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
 The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 11.01.2024

После доработки 27.05.2024

Принята к публикации 30.05.2024

Received 11.01.2024

Revised 27.05.2024

Accepted 30.05.2024