

ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПЫЛЕВИДНЫХ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИИ

С. В. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук, **Н. И. УРБАНОВИЧ**, канд. техн. наук
Белорусский национальный технический университет

А. С. РАКОВЕЦ
РИУП «НТП БНТУ «Политехник»

В работе представлены направления исследований процессов пирометаллургической переработки пылевидных отходов металлургии. Выполнен обзор исследований термодинамики и кинетики процессов отдельного и совместного восстановления железосодержащих и цинксодержащих соединений.

Ключевые слова: оксиды железа, соединения цинка, пылевидные отходы, восстановление, термодинамика, кинетика.

APPROACHES TO INVESTIGATION OF PYROMETALLURGICAL PROCESSING OF METALLURGY DUST WASTE

S. V. KORNEEV, Ph. D. in Technical Sciences, **N. I. URBANOVICH**,
Ph. D. in Technical Sciences
Belarusian National Technical University

A. S. RAKOVETS
Science and Technology Park of BNTU “Polytechnic”

The paper presents the directions of research into the processes of pyrometallurgical processing of pulverized metallurgy waste. A review of studies of thermodynamics and kinetics of the processes of separate and joint reduction of iron-containing and zinc-containing compounds is presented.

Keywords: iron oxides, zinc compounds, pulverized waste, reduction, thermodynamics, kinetics.

Введение. Анализ литературы в области исследований процессов, происходящих при пирометаллургической переработке пылевидных отходов металлургического производства, показал, что

наиболее часто используются методы термического анализа и микроскопии в сочетании с методами анализа химического состава образцов.

Термический анализ в свою очередь подразделяется на ряд методов, которые связаны с конкретными типами физических изменений. При оценке характеристик пылевидных материалов чаще всего необходимо использовать разные методики или комбинацию нескольких методик в зависимости от цели исследований.

Наиболее часто применяемые в исследованиях методы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Методы, применяемые в исследованиях пиromеталлургической переработки пылевидных отходов

Вид изменений	Метод
Термические	DSC Differential Scanning Calorimetry (Дифференциальная сканирующая калориметрия ДСК)
	DTA Differential Thermal Analysis (Дифференциальный термический анализ ДТА)
Изменения массы	TG, TGA Thermal Gravimetric Analysis (Термогравиметрический анализ ТГА)
Изменения размеров	TMA Thermomechanical Analysis (Термомеханический анализ ТМА)
Выделяющиеся газы	EGD Evolved gas detection (Обнаружение выделяющихся газов)
	EGA Evolved gas analysis (Анализ выделяющихся газов)

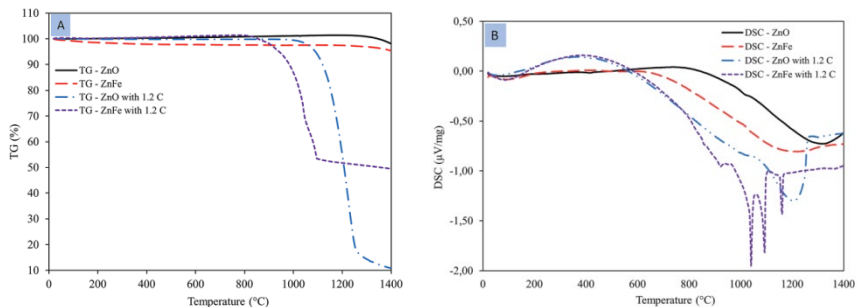
На рисунке 1 приведен пример термического анализа TG и DSC оксида цинка и феррита цинка [1].

Для выбора и разработки эффективных технологий пиromеталлургической переработки отходов электросталеплавильного производства требуется решение комплекса задач:

- 1) изучение условий восстановления оксида цинка;
- 2) изучение условий восстановления цинка из феррита цинка;
- 3) изучение условий восстановления оксидов железа;
- 4) изучение условий совместного восстановления цинка и железа из материала;

5) изучение условий селективного разделения цинка, свинца, кадмия и других металлов, содержащихся в пылевидных отходах;

6) изучение условий эффективного разделения металлической и шлаковой фаз и др.



(A) TG; (B) DSC

Рисунок 1 – Термический анализ оксида цинка и феррита цинка [1]

Исследования, направленные на решение некоторых из обозначенных задач, представлены ниже.

Исследование термодинамики и кинетики процессов восстановления соединений, входящих в состав пыли ЭДП. В работе [2] приведены результаты кинетических исследований реакции восстановления оксида цинка углеродом в присутствии различных добавок. Влияние температуры и добавок Fe_2O_3 , окалины и CaCO_3 на кинетику реакции восстановления измеряли в интервале температур 1173–1373 К в атмосфере азота. Увеличение скорости реакции связано с тем, что Fe_2O_3 , прокатная окалина и CaCO_3 в реакции восстановления способствуют реакции газификации углерода. При этом эффект от добавки CaCO_3 оказывается наибольшим. Скорость восстановления определялась уравнением

$$1 - (1 - R)^{1/3} = k\tau, \quad (1)$$

где R – степень восстановления; k – кинетическая константа; τ – время восстановления.

Также была определена энергия активации E_a .

В работе [3] представлены результаты исследований восстановления оксида цинка из окатышей, изготовленных из пыли электродуговой печи. Скорость восстановления выражалась уравнением (1). Значения k определены для температур 925, 1000, 1075 и 1150 °С. Значительная разница в значениях энергии активации, рассчитанных для реакции с графитом (24,75 ккал/моль), коксом (18,13 ккал/моль) и древесным углем (11,52 ккал/моль), указывает на важную роль реакционной способности восстановителя. Также был сделан вывод, что процесс восстановления оксида цинка в пыли ЭДП в основном контролируется реакцией Будуара (взаимодействия углерода с диоксидом углерода).

В работе [4] показана термодинамика и кинетика вельц-процесса для оптимизации извлечения летучих веществ (особенно цинка). Кинетические параметры оценивались в серии из десяти экспериментов, включающие основные факторы процесса, такие как тип восстановителей (древесный уголь и нефтяной кокс), время (20–120 мин.) и температуру (450–1150 °С). Механические свойства гранул оценивали по испытаниям на прочность при сжатии в холодном состоянии и на падение. Кроме того исследования включали определение характеристик при использовании сканирующей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, рентгенофлуоресцентного анализа, гранулометрического анализа методом лазерной дифракции, а также измерений влажности, насыпной плотности и процентного содержания летучих веществ, связанного углерода и золы.

В первой группе экспериментов использовали пыль в количестве 78,9 %, связующее 4 % и восстановитель в виде древесного угля в количестве 13,1 % (с влажностью 5 %, содержание летучих около 30 %, зольностью 0,77 и содержанием углерода 69 %).

Во второй группе экспериментов использовали 79,9 % пыли, 4 % связующее, 12,1 % восстановитель в виде нефтяного кокса (влажностью 1,2 %, содержанием летучих около 11 %, зольностью 14,37 %, и содержанием углерода 74,38 %).

Предполагалось, что процесс восстановления пыли электродуговых печей (ЭДП) протекает по кинетике первого порядка и, следовательно, кинетическое уравнение может быть представлено формулой

$$-\ln(1 - f) = kt, \quad (2)$$

где f – степень завершенности реакций; k – кинетическая константа; τ – время проведения реакций.

Были определены кинетические кривые карботермического восстановления пыли ЭДП для температур 800, 1050 и 1150 °С. Принятая кинетическая модель показала хорошее соответствие для первых 20 мин. восстановительной реакции. Также в работе представлена диаграмма Аррениуса для карботермического восстановления пыли ЭДП с использованием древесного угля и нефтяного кокса и определена энергия активации E_a .

В работе [5] с использованием исследования кинетики восстановления оксидов цинка и железа определены оптимальные параметры углеродотермического восстановления. Представлены данные по влиянию температуры на степень восстановления цинка и железа в зависимости от скорости нагрева (25 °С/мин и 100 °С/мин).

Влияние температуры и других факторов на кинетику восстановления углеродосодержащих окатышей из металлургической пыли. В работе [6] представлены результаты влияния чистоты материала в виде оксида цинка (99 % и 78 % ZnO) на кинетику восстановления пористых окатышей (пористость 60 %) в газовой смеси N_2/CO (соотношением 2:1) при температуре 1000 °С. Гранулы исследовали под сканирующим электронным микроскопом и анализатором изображений для определения степени реакции на различной глубине гранулы.

В работе [7] приведено описание экспериментов по восстановлению углеродсодержащих окатышей из металлургической пыли, которые проводили в слабоокислительной атмосфере в интервале температур 1348–1573 К. Анализ кинетики и механизма восстановления показал, что скорость восстановления может быть выражена уравнением (1). Сравнение влияния температуры показало, что степень удаления цинка может достигать 97,8 %, а металлизации – 79,9 % при 1573 К по сравнению с 75,3 % и 60,2 % при 1348 К.

В работе [8] отмечается, что один из возможных альтернативных процессов переработки пыли может включать взаимодействие оксида цинка в пыли с твердым или жидким железом. Кроме того, в процессах карботермического восстановления, предназначенных для обработки пыли, образуется металлическое железо, и это железо может участвовать в восстановлении оксида цинка. Восстановление оксида цинка железом изучали термогравиметрическим мето-

дом. Брикетты из порошка оксида цинка и электролитического железа реагировали в интервале температур от 1073 до 1423 К в атмосфере аргона. Сначала был проведен термодинамический анализ с использованием вычислительной системы Facility for the Analysis of Chemical Thermodynamics (FACT), а затем было определено влияние экспериментальных переменных на кинетику реакции. Эти переменные включали скорость потока газообразного аргона, температуру реакции, размер частиц реагента, соотношение железа и оксида цинка, соотношение сторон брикета, давление брикетирования и добавки. Установлено, что первоначально реакция контролировалась химически при энергии активации 230 кДж/моль. Добавки (такие как хлорид натрия и фторид кальция) ускоряли реакцию, и энергия активации составляла 172,5 и 188,7 кДж/моль соответственно. Как только образовался слой продукта, реакция была ограничена диффузией газообразного цинка от границы раздела реакционной среды. Экспериментальные данные были описаны параболическим законом скорости, и константа параболической скорости оказалась равной $K_p = -2,47 + 0,0021T$.

В работе [9] представлены результаты комплексных исследований характеристик пыли и возможностей ее пирометаллургической переработки, а также теоретически обоснованы предельные температуры как совместного, так и селективного извлечения цинка и свинца из пыли электросталеплавильного производства. Экспериментально подтверждена возможность извлечения цветных металлов из пыли ЭДП под воздействием плазменной дуги без дополнительного введения восстановителя. При этом степень извлечения цинка достигает 99 %, а свинца – 97 %. Показано, что при низком содержании углерода (менее 3 мас. %) первым извлекается свинец, затем цинк, а при увеличении содержания углерода цинк и свинец извлекаются одновременно.

В работе [10] изучен химический, фазовый состав и микроструктура пыли газоочистных установок электросталеплавильных печей. Установлено, что пыль газоочистки ЭДП представляет собой неоднородную сложнокомпонентную систему с размерами частиц от 0,12 до 50,0 мкм и с непостоянным составом, при этом оксид цинка находится в основном в связанном состоянии в составе фазы франклинита $(Zn, Mn, Fe)(Fe, Mn)_2O_4$. Определены оптимальные условия процесса восстановления пыли, что позволило разработать лабора-

торный метод одноэтапной высокотемпературной обработки в восстановительной среде с получением таких продуктов, как губчатое железо с высокой степенью металлизации (до 97,5 %) и оксид цинка с содержанием основного вещества около 98,4 мас. %.

В работе [11] проанализировано влияние формы окатышей на процесс их прямого восстановления и получены результаты по степени металлизации окатышей и скорости удаления цинка. Создана математическая модель восстановления углеродсодержащих окатышей различных форм в печи с вращающимся подом. Удельную площадь поверхности (δ) определяли, как ключевой характеристический параметр гранул различной формы. Также определяли взаимосвязь между степенью металлизации окатышей, скоростью удаления цинка, временем восстановления и формой гранул. Результаты показали, что начальная температура гранул различной формы быстро повышается в углах гранул, где кривизна больше. Во внутренней части, где температура меньше, железо восстанавливается в первую очередь. Время достижения условий, при которых гранулы различной формы начинают восстанавливаться составляет примерно 200 с.

Влияние связующего и других добавок на прочность и скорость металлизации углеродсодержащих окатышей. Часть работ направлена на определение оптимального связующего, используемого для окускования пылевидных отходов в отношении прочностных показателей, скорости удаления цинка и металлизации и общего содержания балластных соединений в переработанном продукте.

В работе [12] показана технология холодного окускования для производства углесодержащих композиционных окатышей. В качестве связующего использовался глиноземистый цемент, который придавал пеллетам высокую механическую прочность, в том числе и при повышенных температурах. Результаты лабораторных испытаний показали высокую скорость металлизации окатышей благодаря тесному контакту частиц угля и железной руды в окатышах.

В работе [13] представлены результаты испытаний железорудно-угольных композиционных окатышей, изготовленных с использованием различных связующих веществ, таких как известь, гашеная известь, декстроза, патока и полиакрилат натрия (по отдельности или в комбинации). Комбинация «гашеная известь-декстроза» показала самую высокую прочность среди различных вяжущих, исполь-

зубных для производства композиционных брикетов, и поэтому была выбрана для производства композиционных окатышей при восстановительной плавке.

Работа [14] посвящена изучению влияния CaO на восстановительные характеристики железорудно-угольных композиционных окатышей, нагреваемых в лабораторной печи с вращающимся подом с многослойным слоем при температуре 1250 °С в течение 20 мин. Уменьшенные гранулы были исследованы с помощью измерения потери веса, измерения пористости, фазового анализа с помощью XRD и изучения морфологии с помощью SEM. Добавление CaO к композитным гранулам показало разные эффекты при различных уровнях содержания углерода. Для окатышей с более высоким содержанием углерода (мольное отношение C / Fe₂O₃ при верхнем стехиометрическом уровне, равном 3) добавление CaO значительно увеличивало степень восстановления для всех трех слоев до определенного предела 4 мас.% (после этого степень восстановления снижается с дальнейшим увеличением процентного содержания CaO в окатышах). Для окатышей с низким содержанием углерода (мольное отношение C / Fe₂O₃ – 1,66), добавление CaO к гранулам не показало какого-либо положительного эффекта.

Исследование влияния различных факторов на процесс переработки пыли ЭДП в печах с вращающимся подом. В работе [15] приведены результаты исследований влияния различных форм углерода в угольных и композиционных окатышах на основе полукокса на кинетику восстановления в лабораторной печи с вращающимся подом с многоярусным слоем при температуре 1250 °С. Композитные окатыши показали более высокую эффективность восстановления, чем окатыши на основе угля даже при сравнимых уровнях фиксированного углерода, что связано с микропористыми морфологическими особенностями. Образование фаялита в верхнем слое ограничивало максимальную степень восстановления на уровне 80 %.

Работа [16] содержит результаты исследований влияния молярного отношения углерода к гематиту на эффективность восстановления железорудно-угольных композитных окатышей, восстановленных при 1250 °С в течение 20 мин в лабораторной печи с вращающимся подом (RHF) с многослойным способом загрузки. Восстановленные окатыши были охарактеризованы посредством

измерения потери веса, оценки пористости, усадки, качественного и количественного фазового анализа с помощью XRD. Рабочие параметры, такие как степень восстановления, металлизация, эффективность использования углерода, производительность и прочность на сжатие, были рассчитаны для сравнения эффективности процесса при различных уровнях содержания углерода в гранулах. Гранулы с оптимальным соотношением углерода к гематиту (мольное отношение $C / Fe_2O_3 = 1,66$), которое намного ниже стехиометрического количества углерода, необходимого для прямого восстановления гематита, дали максимальное восстановление, лучшее использование углерода и производительность для всех трех слоев. Верхний слой демонстрировал максимальное восстановление при сравнительно более низком уровне углерода (мольное отношение $C / Fe_2O_3 < 2,33$) в пеллете, в то время как нижний слой превышал восстановление верхнего слоя при более высоком уровне углерода (мольное отношение $C / Fe_2O_3 > 2,33$). Корреляция между степенью восстановления и металлизацией указывала на неизотермическую кинетику под влиянием тепло- и массопереноса в RHF с многослойным материалом. Прочность на сжатие частично восстановленных окатышей с оптимальным содержанием углерода (мольное отношение $C / Fe_2O_3 = 1,66$) показала, что они потенциально могут быть использованы в качестве альтернативного сырья в доменной печи или любом другом плавильном агрегате.

Авторы работы [17] отмечают, что железные гранулы, близкие по составу к чугуну, могут быть получены с использованием композиционных окатышей при высоких температурах (1350–1400 °C) и за короткое время восстановления (15–20 мин) методом восстановительной плавки. Отмечается, что повышение температуры и времени положительно влияет на восстановление и плавление окатышей. Избыток углерода препятствует слиянию капель металла. Железо, полученное из образца с основностью $CaO / SiO_2 = 0,68$, имеет оптимальные физико-химические свойства. Также установлено, что снижение или повышение основности отрицательно сказывается на свойствах гранул железа.

В работе [18] для повышения эффективности разделения шлака и железа выдвинута идея разделения шлака (твердое состояние) и железа (расплавленное состояние) в процессе работы печи с вращающимся подом при более низкой температуре. Исследован процесс

формирования железных самородков, в том числе экспериментально с использованием электрической печи сопротивления, моделирующей работу печи с вращающимся подом. Реакция восстановления углеродсодержащих окатышей протекает в основном при 1000 и 1200 °С. Когда температура выше 1200 °С, степень металлизации углеродсодержащих окатышей превышает 93 %, и реакция восстановления практически завершена. Реакция прямого науглероживания протекает при температуре выше 1000 °С, при этом степень науглероживания значительно возрастает при 1200 и 1300 °С после определенного времени выдержки. Кроме того, для достижения разделения шлака (твердое состояние) и железа (расплавленное состояние) необходимо повысить температуру плавления шлаковой фазы. Разделение шлака (твердое состояние) и железа (расплавленное состояние) может быть достигнуто при температуре ниже 1300 °С, а при времени выдержки 20 мин (отношение $C / O = 0,7$, основность менее 0,5 и содержание $Na_2CO_3 - 3 \%$) скорость извлечения железа может достигать 90 %, с долей железных самородков более 3 мм почти 90 %.

В работе [19] представлена пирометаллургическая технология переработки пыли ЭДП при содержании пыли в шихте около 18 % (для работы по такой технологии требуется использование окалины в количестве около 51 % от шихты). Проведены аналитические исследования образцов пыли ЭСПП ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» при помощи методов лазерной дифракции, рентгеноспектрального микроанализа, рентгенофазового и рентгенофлуоресцентного методов анализов. Представлены результаты экспериментальных работ по восстановительной плавке окомкованной шихты в лабораторной установке. В ходе экспериментов было определено количество добавляемых флюсов в шихту для регулирования основности образующегося шлака и оптимальный температурный режим восстановительной плавки. В результате лабораторных испытаний были получены образцы чугуна с размерами гранул 10–15 мм с содержанием, % мас.: Fe – 95,27; C – 4,4. Химический состав конденсата оксида цинка, % мас.: ZnO – 68,8; $Fe_2O_3 - 3,68$; $Na_2O - 8,21$; Cl – 5,32; $SO_3 - 4,92$; $K_2O - 3,32$; PbO – 2,11 и F – 1,31. Исследован процесс удаления галогенов из полученного при плавке конденсата оксида цинка прокалкой.

В работе [20] описана комплексная модель процесса прямого восстановления в промышленной печи с вращающимся подом (RHF). Интегрированная модель включает в себя три математические подмодели и одну физическую модель, а именно: трехмерную (3-D) CFD-модель течения газа и теплообмена в камере RHF, одномерную (1-D) CFD-модель прямого восстановления внутри гранулы, модель равновесия энергии/массы, и восстановительный физический эксперимент с использованием нагревательной печи. Модель проверяли путем сравнения результатов моделирования с измерениями температуры, давления в печи и показателей окатышей. Затем модель использовали для описания процессов в печи и поведения окатышей с точки зрения теплопередачи, прямого восстановления и удаления ряда тяжелых и щелочных металлов в промышленных условиях RHF. Результаты показывают, что температура печи в секции предварительного нагрева должна поддерживаться на более высоком уровне в RHF промышленного масштаба по сравнению с температурой в RHF пилотного типа. Скорость удаления элементов тяжелых и щелочных металлов внутри композитной гранулы выше, чем при металлизации железом, особенно в следующем порядке Pb, Zn, K и Na.

В работе [21] рассмотрена концепция производства чугуна, включающая сочетание печи с вращающимся подом и стадии плавки с жидким чугуном. В RHF в качестве шихтового материала используются гранулы композита железо-оксид-углерод, а конечным продуктом является железо прямого восстановления (DRI) в твердом или расплавленном состоянии. В качестве источников оксида железа использовали как искусственный оксид железа, так и природные гематитовые и таконитовые руды. Восстановителями служили полукокс и дегазированный древесный уголь. Установлено, что пеллеты из искусственного оксида железа и древесного угля претерпевают значительное набухание в низкотемпературных условиях, что затрудняет перенос внешнего тепла к нижним слоям. Если среднюю степень восстановления, намеченную для RHF, уменьшить с 95 до примерно 70 % за счет соединения RHF с плавильной печью, производительность RHF можно повысить в 1,5–2 раза. Было обнаружено, что использование двух- или трехслойного способа подачи материала на под лучше, чем однослойного, для получения более высокой производительности.

Исследование микроволнового нагрева в процессах переработки пыли ЭДП. В последнее время большое количество исследований направлено на изучение процессов восстановления оксидов цинка и железа из пыли ЭДП при использовании микроволнового нагрева. В работе [22] отмечается, что использование микроволнового нагрева пыли с различным содержанием цинка позволяет существенно сократить время реакций. Например, восстановление в микроволновой печи пыли ЭДП с высоким содержанием цинка (17,99 мас.% Zn) с использованием различных восстановителей, включая нефтяной кокс, графит и кокс, показало, что процесс восстановления может быть завершен в течение 12 мин, при этом процент удаления цинка составляет 99,23 %, а степень металлизации железа составляет 100 %.

В работе [1] приведены результаты исследований кинетики восстановления оксида цинка и феррита цинка как при стандартном печном нагреве, так и при нагреве микроволнами. Получены значения энергии активации и показано их существенное снижение в случае микроволнового нагрева.

Выводы. Обзор результатов различных исследований, доступных в литературе, позволяет сделать вывод, что в настоящее время, несмотря на отдельные достаточно подробные исследования процессов восстановления оксидов цинка и железа, практически отсутствуют готовые методики, позволяющие точно рассчитать состояние материала в процессе и в результате пирометаллургической переработки. При использовании отходов со сложным химическим составом, как правило, необходимо существенно его корректировать добавками, позволяющими как повысить степень извлечения металлов (в основном Zn, Pb, Cd, Fe) или извлечь их отдельно, так и при необходимости разделить восстановленное железо и шлаковую составляющую с переходом в жидкое состояние в процессе переработки. Также можно утверждать, что имеется ряд экспериментально установленных закономерностей, например, ускорение процессов при нагреве материала микроволнами и др. Эти закономерности требуют более подробного теоретического обоснования. Кроме того, существует ряд противоречивых данных, связанных, по всей видимости, с различными условиями проведения экспериментов и влиянием на процессы большого количества фак-

торов, таких как температура, состав отходов, их дисперсность, вид и количество восстановителя, способ нагрева и т. д. В этой связи все еще актуально установление закономерностей восстановления оксидов цинка и железа и поиск приемлемых методик расчета основных параметров процесса для адаптации их к расчету физико-химических процессов при переработке сложных по составу пылевидных материалов, содержащих оксиды цинка и железа, а также другие соединения.

Список литературы

1. **Microwave** catalyzed carbothermic reduction of zinc oxide and zinc ferrite: effect of microwave energy on the reaction activation energy / M. Omran [et al.] // RSC Advances. – 2020. – Vol. 10. – P. 23959–23968.

2. **A Kinetic** study of the carbothermic reduction of zinc oxide with various additives / B. S. Kim [et al.] // Mater. Trans. – 2006. – Vol. 47, No. 9. – P. 2421–2426.

3. **Bafghi, M.** A kinetic study on the carbothermic reduction of zinc oxide from electric arc furnace dust / M. Bafghi, M. Karimi, M. Adeli // Iranian Journal of Materials Science and Engineering. – 2013. – No. 10. – P. 18–30.

4. **Microstructural**, thermochemistry and mechanical evaluation of self-reducing pellets using electric arc furnace (EAF) dust containing zinc for Waelz process / L. Hernández [et al.] // Revista Matéria. – 2018. – Vol. 23, No. 2. – P. 580–594.

5. **Юрьев, Б. П.** Исследование кинетики восстановления оксидов цинка и железа с целью разработки технологии по утилизации цинк-содержащих пылей металлургического производства / Б. П. Юрьев, В. А. Гольцев, В. А. Дудко // Черная металлургия. Бюллетень науч.-техн. и эконом. инф.-ции. – 2017. – Т. 10. – С. 96–105.

6. **Banerjee, A.** Reduction kinetics of porous zinc oxide pellet with CO–N₂ gas mixture / A. Banerjee, P. K. Sen, S. K. Roy // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. – 2008. – Vol. 117, No. 4. – P. 221–230.

7. **Reduction** kinetics of carbon containing pellets made from metallurgical dust / H. M. Long [et al.] // Ironmaking & Steelmaking, 39:8, – P. 585–592.

8. Donald, J. R. A Kinetic study of the reaction of zinc oxide with iron powder / J. R. Donald, C. A. Pickles // *Metall Mater Trans B.* – 1996. – No. 27. – P. 363–374

9. Алпатова А. А. Исследование процессов пылеобразования при дуговом нагреве металла и свойств пыли с целью ее утилизации: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.07 / А. А. Алпатова; Нац. исслед. техн. ун-т «МИСиС». – Москва, 2016. – 158 с.

10. Мацукевич, И. В. Разделение железо- и цинксодержащих компонентов пыли газоочисток электросталеплавильных производств / И. В. Мацукевич, Н. В. Кулинич, В. В. Тавгень // *Весці. нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук.* – 2022. – Т. 58, № 2. – С. 203–210.

11. Effects of carbon-containing pellet shapes on its direct reduction process: a numerical study / N. Li [et al.] // *Trans Indian Inst Met.* – 2021. – Vol. 74. – P. 21–31.

12. Direct reduced iron production using cold bonded carbon bearing pellets Part 1 – Laboratory metallization / J. Aota [et al.] // *Ironmaking & Steelmaking.* – 2006. – Vol. 33, No. 5. – P. 426–428.

13. Sah, R. Effects of binder on the properties of iron ore-coal composite pellets / R. Sah, S. K. Dutta // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review.* – 2010. – Vol. 31, No. 2. – P. 73–85.

14. Mishra, S. Effect of CaO on the reduction behaviour of iron ore-coal composite pellets in multi-layer bed rotary hearth furnace / S. Mishra, G. G. Roy // *Ironmaking & Steelmaking.* – 2018. – Vol. 45, No. 5. – P. 426–433.

15. Effect of different forms of carbon on the reduction behaviour of iron ore-carbonaceous material composite pellets in multi-layer bed rotary hearth furnace (RHF) / S. Priyadarshi [et al.] // *Canadian Metallurgical Quarterly.* – 2021. – Vol. 60, No. 4. – P. 281–293.

16. Mishra, S. Effect of amount of carbon on the reduction efficiency of iron ore-coal composite pellets in multi-layer bed rotary hearth furnace (RHF) / S. Mishra, G. G. Roy // *Metall Mater Trans B.* – 2016. – Vol. 47. – P. 2347–2356.

17. Birol, B. The Effect of reduction parameters on iron nugget production from composite pellets / B. Birol, M. N. Saridede // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review.* – 2013. – Vol. 34, No. 4. – P. 195–201.

18. Mechanism and influencing factors of iron nuggets forming in rotary hearth furnace process at lower temperature / H. Han [et al.] // Metall Mater Trans B. – 2015. – Vol. 46. – P. 2208–2217.

19. Патрушов А. Е. Разработка пирометаллургической технологии извлечения железа и цинка из пылей электросталеплавильного производства: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.2 / А. Е. Патрушов; Иркутский нац. иссл. техн. ун-т. – Иркутск: 2021. – 137 с.

20. Modeling of thermochemical behavior in an industrial-scale rotary hearth furnace for metallurgical dust recycling / Y. L. Wu [et al.] // Metall Mater Trans B. – 2017. – Vol. 48. – P. 2403–2418.

21. Halder, S. Reduction of iron-oxide-carbon composites: Part II. Rates of reduction of composite pellets in a rotary hearth furnace simulator / S. Halder, R. Fruehan // Metall Mater Trans B. – 2008. – Vol. 39. – P. 796–808.

22. Microwave-intensified treatment of low-zinc EAF dust: A route toward high-grade metallized product with a focus on multiple elements / L. Wang [et al.] // Powder Technology. – 2021. – Vol. 383. – P. 509–521.

References

1. Microwave catalyzed carbothermic reduction of zinc oxide and zinc ferrite: effect of microwave energy on the reaction activation energy / M. Omran [et al.] // RSC Advances. – 2020. – Vol. 10. – P. 23959–23968.

2. A Kinetic study of the carbothermic reduction of zinc oxide with various additives / B. S. Kim [et al.] // Mater. Trans. – 2006. – Vol. 47, No. 9. – P. 2421–2426.

3. Bafghi, M. A kinetic study on the carbothermic reduction of zinc oxide from electric arc furnace dust / M. Bafghi, M. Karimi, M. Adeli // Iranian Journal of Materials Science and Engineering. – 2013. – No. 10. – P. 18–30.

4. Microstructural, thermochemistry and mechanical evaluation of self-reducing pellets using electric arc furnace (EAF) dust containing zinc for Waelz process / L. Hernández [et al.] // Revista Matéria. – 2018. – Vol. 23, No. 2. – P. 580–594.

5. YUr'ev, B. P. *Issledovanie kinetiki vosstanovleniya oksidov cinka i zheleza s cel'yu razrabotki tekhnologii po utilizacii cinksoderzhashchih pylej metallurgicheskogo proizvodstva* [Study of the kinetics of the reduction of zinc and iron oxides in order to develop a technology for the utilization of zinc-containing dust from metallurgical production] / B. P. YUr'ev, V. A. Gol'cev, V. A. Dudko // *Chernaya metallurgiya*.

Byulleten' nauch.-tekhn. i ekonom. inf-cii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information. – 2017. Vol. 10. – P. 96–105.

6. Banerjee, A. Reduction kinetics of porous zinc oxide pellet with CO–N₂ gas mixture / A. Banerjee, P. K. Sen, S. K. Roy // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy.* – 2008. – Vol. 117, No. 4. – P. 221–230.

7. Reduction kinetics of carbon containing pellets made from metallurgical dust / H. M. Long [et al.] // *Ironmaking & Steelmaking*, 39:8, – P. 585–592.

8. Donald, J. R. A Kinetic study of the reaction of zinc oxide with iron powder / J. R. Donald, C. A. Pickles // *Metall Mater Trans B.* – 1996. – No. 27. – P. 363–374

9. Alpatova, A. A. *Issledovanie processov pyleobrazovaniya pri dugovom nagreve metalla i svoystv pyli s cel'yu ee utilizacii* [Investigation of dust formation processes during metal arc heating and properties of dust for the purpose of its utilization]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.16.07 / A. A. Alpatova; National Research Technological University “MISiS”. – Moscow, 2016. – 158 p.

10. Macukevich, I. V. *Razdelenie zhelezo- i cinksoderzhashchih komponentov pyli gazoochistok elektrostaleplavil'nyh proizvodstv* [Separation of iron- and zinc-containing components of gas cleaning dust of electric steel-smelting production] / I. V. Macukevich, N. V. Kulinich, V. V. Tavgen' // *Vesci Nacional'noj akademii navuk Belarusi. Seriya himicheskikh nauk = News of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Sciences Series.* – 2022. – Vol. 58, No. 2. – P. 203–210.

11. Effects of carbon-containing pellet shapes on its direct reduction process: a numerical study / N. Li [et al.] // *Trans Indian Inst Met.* – 2021. – Vol. 74. – P. 21–31.

12. Direct reduced iron production using cold bonded carbon bearing pellets Part 1 – Laboratory metallization / J. Aota [et al.] // *Ironmaking & Steelmaking.* – 2006. – Vol. 33, No. 5. – P. 426–428.

13. Sah, R. Effects of binder on the properties of iron ore-coal composite pellets / R. Sah, S. K. Dutta // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review.* – 2010. – Vol. 31, No. 2. – P. 73–85.

14. Mishra, S. Effect of CaO on the reduction behaviour of iron ore-coal composite pellets in multi-layer bed rotary hearth furnace / S. Mish-

ra, G. G. Roy // *Ironmaking & Steelmaking*. – 2018. – Vol. 45, No. 5. – P. 426–433.

15. Effect of different forms of carbon on the reduction behaviour of iron ore-carbonaceous material composite pellets in multi-layer bed rotary hearth furnace (RHF) / S. Priyadarshi [et al.] // *Canadian Metallurgical Quarterly*. – 2021. – Vol. 60, No. 4. – P. 281–293.

16. Mishra, S. Effect of amount of carbon on the reduction efficiency of iron ore-coal composite pellets in multi-layer bed rotary hearth furnace (RHF) / S. Mishra, G. G. Roy // *Metall Mater Trans B*. – 2016. – Vol. 47. – P. 2347–2356.

17. Birol, B. The Effect of reduction parameters on iron nugget production from composite pellets / B. Birol, M. N. Saridede // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – 2013. – Vol. 34, No. 4. – P. 195–201.

18. Mechanism and influencing factors of iron nuggets forming in rotary hearth furnace process at lower temperature / H. Han [et al.] // *Metall Mater Trans B*. – 2015. – Vol. 46. – P. 2208–2217.

19. Patrushov, A.E. *Razrabotka pirometallurgicheskoy tekhnologii izvlecheniya zheleza i cinka iz pylej elektrostaleplavil'nogo proizvodstva* [Development of a pyrometallurgical technology for the extraction of iron and zinc from dusts of electric steelmaking]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 2.6.2 / A. E. Patrushov; Irkutsk National Research Technical University. – Irkutsk, 2021. – 137 p.

20. Modeling of thermochemical behavior in an industrial-scale rotary hearth furnace for metallurgical dust recycling / Y. L. Wu [et al.] // *Metall Mater Trans B*. – 2017. – Vol. 48. – P. 2403–2418.

21. Halder, S. Reduction of iron-oxide-carbon composites: Part II. Rates of reduction of composite pellets in a rotary hearth furnace simulator / S. Halder, R. Fruehan // *Metall Mater Trans B*. – 2008. – Vol. 39. – P. 796–808.

22. Microwave-intensified treatment of low-zinc EAF dust: A route toward high-grade metallized product with a focus on multiple elements / L. Wang [et al.] // *Powder Technology*. – 2021. – Vol. 383. – P. 509–521.

Поступила 21.11.2022
Received 21.11.2022