ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОКСИДЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

*А. Е. АНИКИН, канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии;
Г. В. ГАЛЕВСКИЙ, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой металлургии
цветных металлов и химической технологии, kafcmet@sibsiu.ru;
В. В. РУДНЕВА, д-р техн. наук, профессор кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии
(Сибирский государственный индустриальный университет, Россия, г. Новокузнецк)*

Аннотация. Приведены результаты исследования физико-химических характеристик прокатной окалины и обезвоженного шлама газоочистки кислородно-конвертерного производства, выполненного для оценки технологической целесообразности применения их в процессах металлзации. Исследования проведены с использованием стандартных методик определения химического, фазового, гранулометрического составов и плотности мелкозернистых и порошкообразных материалов. Установлено, что содержание общего железа, оксидов FeO и Fe₂O₃, серы и фосфора составляет в окалине 73,3, 75,5, 20,9, 0,036 и 0,019 %, в шламе — 41,2, 4,7, 53,7, 0,21 и 0,15 % соответственно. Шлам содержит также до 20,9 % CaO и 4,3 % углерода общего. Гранулометрические составы окалины и шлама существенно отличаются: содержание классов крупности +1,0 мм и –0,016 мм в окалине составляет 63,3 и 0 %, в шламе — 14,8 и 44,5 %. Истинная плотность окалины составляет 4,6–4,9 г/см³. Полученные результаты подтверждают технологическую целесообразность использования мелкозернистой окалины и порошкообразного шлама в процессах металлзации, включающих их предварительное брикетирование в составе композиции с углеродистым восстановителем.

Ключевые слова: прокатная окалина; шлам газоочисток; химический, фазовый, гранулометрический составы окалины и шлама; брикетирование; металлзация.

Ссылка для цитирования. Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В. Исследование физико-химических характеристик оксиджелезосодержащего техногенного сырья // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 9. С. 107–112.

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-9-107-112

В настоящее время известны следующие технологические варианты металлзации различного сырья [1–4]:

- получение частично металлзированных материалов для доменных печей;
- получение металлзованного продукта (губчатого железа) в твердом виде для переплавки в сталеплавильных агрегатах (температура 500–1000 °С);
- получение металлзованного продукта в пластическом состоянии (получение кричного железа) для различных целей, в том числе как вариант пирометаллургического обогащения труднообогатимых, бедных и комплексных руд (температура 1100–1400 °С);
- получение жидкого металла (чугуна или полупродукта) для переплава в сталеплавильных печах (температура выше 1200–1400 °С).

Основными твердофазными процессами металлзации являются процессы Midrex, HyL, Danarex, Finmet и др. [5–9], а основными жидкофазными процессами восстановления железа — Corex, Finex, Ромелт, Ausmelt, HIs melt, Technored и др. [2–4].

Металлзация мелкозернистых и порошкообразных оксиджелезосодержащих отходов явля-

ется важным направлением в металлургии. По данным World Steel Association (WSA) [10], производство железа прямого восстановления за последние 10 лет в мире выросло на 18 %, в России — на 66 %, что говорит о чрезвычайно динамичном развитии данного направления. Особенно актуальной металлзация является для мини-заводов в связи с отсутствием в их составе агломерационного производства, позволяющего металлургическим предприятиям полного цикла перерабатывать прокатную окалину, шламы доменного и сталеплавильного производств и другие оксиджелезосодержащие отходы. Актуальность проблемы обусловлена значительным числом мини-заводов в мире — около 1000 [11] и, соответственно, значительным объемом образования оксиджелезосодержащих отходов. По прогнозам, в 2020 г. более 50 % мирового производства стали будет обеспечено именно мини-заводами. На территории бывшего СССР уже построено семь мини-заводов: в России (Комсомольск-на-Амуре, Калуга, Саратовская, Ростовская и Тюменская области), Белоруссии (Жлобин) и Молдавии (Кишинев) [11, 12].

Для исследования процессов металлзации оксиджелезосодержащего техногенного сырья

необходимо их физико-химическая аттестация. В качестве объекта исследования выбраны прокатная окалина и шламы газоочистки кислородно-конвертерного цеха № 1 АО ЕВРАЗ ЗСМК

(шлам ККЦ). Эти материалы исследовались и ранее [13–16], но приведенные данные либо противоречивы, либо недостаточно полны.

Цель исследования

Целью настоящей работы является исследование физико-химических характеристик химического, гранулометрического и фазового составов, плотности прокатной окислыны и обезвоженного шлама газоочистки кислородно-конвертер-

ного производства — перспективного техногенного оксиджелезосодержащего сырья для получения металлизированных брикетов, востребованных в производстве стали.

Общая характеристика материалов и методы их исследования

Прокатная окалина образуется в результате вторичного окисления поверхностного слоя металла при нагреве перед прокаткой. При нагреве 1 т стали образуется примерно 25–30 кг окислыны (2,5–3,0 %) [8]. По данным WSA [5], в мире ежегодно образуется до 50 млн т прокатной окислыны, в России — до 1,5 млн т. На площадке строительного проката АО ЕВРАЗ ЗСМК за год образуется примерно 200 тыс. т прокатной окислыны. По данным работы [6], в среднем на одном металлургическом мини-заводе производится 1,0–1,5 млн т стального проката, следовательно, образуется примерно 25–45 тыс. т прокатной окислыны.

В настоящее время стандартной является следующая схема технологического обращения с прокатной окислыной.

1. Окислыны первичных отстойников. Окислыны является продуктом окисления наружного слоя раскаленного металла. Как правило, технологическая линия прокатных станов представляет собой цепь последовательно соединенных звеньев: нагревательная печь (колодец) – черновая группа клетей – чистовая группа клетей – оборудование для порезки проката – холодильник. Все звенья технологически связаны рольгангами. По всей технологической цепочке предусмотрены специальные подстановые тоннели, куда поступает использованная после охлаждения оборудования стана вода. Сюда же попадает и отделенная от прокатываемого металла окислыны. Отделение окислыны производится по всей технологической линии. После нагрева в печи или колодце слиток поступает на приемный рольганг, где предусмотрен отбойник окислыны. Окислыны удаляется также гидросбивом, паровзрывным способом, окислыноломателями. Вся отделенная окислыны поступает в подстановый тоннель и транспортируется водой в первичный отстойник окислыны, расположенный в цехе и представляющий собой железобетонный колодец прямоугольной формы с двумя рукавами — подводным и отводящим. В отстойнике осаждаются наиболее крупные частицы окислыны раз-

мером до 2,5 мм при среднем диаметре частиц 0,5–0,7 мм. Частицы окислыны имеют пластинчатую форму. При истинной плотности 4,6–4,9 г/см³ насыпная плотность составляет 1,57–1,37 г/см³. При большом поступлении смазочных материалов в отстойники в окислыне обнаруживаются нефтепродукты, что отрицательно влияет на дальнейшую ее утилизацию. В этой окислыне содержится до 1,74–3,8 % масел. Из первичного отстойника окислыны отгружается грейферным краном в вагоны.

2. Окислыны вторичных отстойников. После первичных отстойников вода с мелкими частицами окислыны (менее 0,1 мм) поступает на промежуточную насосную станцию, а от нее под давлением подается на вторичные отстойники. Как правило, это многосекционные горизонтальные отстойники. На отстойнике предусмотрена система маслоудаления. Окислыны вторичных отстойников содержит повышенное количество нефтепродуктов и воды, что затрудняет ее подготовку и утилизацию. По этой причине этот материал утилизируется в среднем всего на 75,1 %. Окислыны из отстойника отбирается грейферным краном. Часть более крупной окислыны отбирается из карманов секций и складывается на специальную площадку для подсушивания. По мере поступления вагонов она отгружается потребителям. Содержание нефтепродуктов в этой окислыне составляет 1,8 %. Другая часть более мелкой окислыны с содержанием нефтепродуктов до 15 % складывается в бетонном бункере и периодически вывозится в отвал.

Наиболее широкое применение окислыны нашла в агломерационном производстве в качестве железосодержащего компонента аглошихты.

Шламы ККЦ образуются при мокрой газоочистке конвертерных газов. Шламы относятся к богатым (Fe_{общ} = 55–67 %) или относительно богатым железом (Fe_{общ} = 40–55 %). При мокрой газоочистке образуется 10–30 кг шламов на 1 т выплавляемой стали (1–3 %) [9]. Следовательно, в

мире образуется примерно 14–38 млн т шламов ККЦ, в России — 0,5–1,5 млн т.

В настоящее время стандартной является следующая схема технологического обращения со шламами ККЦ. Шлам образуется в результате разбрызгивания сверху потока технической воды на подающиеся в скруббер снизу конвертерные газы, содержащие высокодисперсную пыль. Утилизация суспензии шлама проводится следующим образом. Шлам передается на комплекс обезвоживания, состоящий из радиального отстойника, вакуум-фильтров и сушильного барабана. В радиальном отстойнике происходит сгущение шламовой пульпы с 200 до 600 г/л, в вакуум-фильтре суспензия шлама фильтруется до влажности 32–36 %, в сушильном барабане шламовая паста сушится при температуре 110–120 °С до влажности 8–10 %. Обезвоженный шлак отгружается потребителю, а осветленная вода доочищается на магнитно-водных сепарационных установках и возвращается в оборотный цикл газоочистки.

Наиболее широкое применение обезвоженный шлак нашел в агломерационном производстве в качестве железосодержащего компонента аглошихты. Удельный расход шлама может достигать 200 кг/т агломерата. Однако существенным недостатком данной технологии является тот факт, что в получаемом агломерате повышается содержание цинка и свинца, что недопустимо вследствие значительного влияния указанных примесей на кладку доменных печей. В связи с этим предлагается ряд альтернативных технологий, таких как схема с термообработкой шлама в барабанной вращающейся печи, схема с обработкой шлама азотнокислым отработанным травильным раствором на станции нейтрализации, а также комбинированная двухстадийная схема с твердофазной металлизацией и удалением цинка из шлама и дальнейшее жидкофазное восстановление частично металлизированного полупродукта. Но некоторые металлургические комбинаты, в частности АО ЕВРАЗ ЗСМК, часть шлама сбрасывают в шламохранилища. В шламохранилище АО ЕВРАЗ ЗСМК накоплено около 2,7 млн т железа в составе железосодержащих шламов.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты определения химического состава прокатной окалины и шлама приведены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что прокатная окалина имеет большее содержание железа общего (73,3 %), чем шлак ККЦ-1 (41,18 %). Следует отметить, что содержание железа общего в шламе

Следует отметить, что шламы газоочистки разных кислородно-конвертерных цехов значительно различаются по свойствам ввиду того, что используются различные технологии плавки, а также существует три технологии отвода и очистки отходящих конвертерных газов:

- системы, работающие с подсосом воздуха через зазор между конвертером и котлом-охладителем и полным дожиганием в последнем оксида углерода, т. е. с коэффициентом расхода воздуха $\alpha > 1$;

- системы, работающие без доступа воздуха в газовый тракт и без дожигания оксида углерода, т. е. при $\alpha < 0,15$;

- системы, работающие с частичным дожиганием оксида углерода в котле-охладителе конвертерных газов, т. е. при $1 > \alpha > 0$.

При выборе между шламами ККЦ-1 и ККЦ-2 АО ЕВРАЗ ЗСМК остановились на шламе ККЦ-1 ввиду большего содержания в нем железа общего.

При проведении анализа физико-химических свойств вышеуказанных материалов определялись следующие характеристики: химический, гранулометрический и фазовый составы, а также плотность.

Определение химического состава проводилось по ГОСТ Р 52939–2008. Массовая доля железа общего определялась по ГОСТ 23581.18–81 (издание 1987 г. с изм. № 1 от мая 1987 г.), массовая доля оксида железа (II) — по ГОСТ 23581.3–79 (издание 1986 г. с изм. № 1 от июля 1982 г. и № 2 от января 1986 г.), железа металлического — по ГОСТ 23581.11–79 (издание 1986 г. с изм. № 1 от января 1986 г.), мышьяка — по ГОСТ 23581.8–79 (издание 1986 г. с изм. № 1 от января 1984 г. и № 2 от января 1986 г.), фосфора — по ГОСТ 23581.19–91, серы — по ГОСТ 23581.20–81 (издание 1987 г. с изм. № 1 от мая 1987 г.), меди — по ГОСТ 23581.6–79 (издание 1986 г. с изм. № 1 от января 1984 г. и № 2 от января 1986 г.).

Определение гранулометрического состава проводилось по ГОСТ 27562–87, фазовый состав определялся методом рентгеновского анализа. Определение плотности проводилось по ГОСТ 26732–88.

ККЦ-2 составляет около 35 %. В распределении железа по оксидам наблюдается следующая картина: в прокатной окалине на долю FeO приходится 75,5 %, а на долю Fe₂O₃ — 20,86 %; в шламе, наоборот, на долю FeO приходится 4,69 %, а на долю Fe₂O₃ — 53,67 %.

ТАБЛИЦА 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОКАТНОЙ ОКАЛИНЫ И ШЛАМА

TABLE 1. CHEMICAL COMPOSITION OF ROLLING SCALE AND SLUDGE

Химический состав, %	Окалина	Шлам
Fe _{общ}	73,30	41,18
Fe _{привед}	Не определялось	54,08
Fe ₂ O ₃	20,86	53,67
FeO	75,50	4,69
SiO ₂	2,24	1,47
Al ₂ O ₃	0,20	0,12
CaO	0,24	20,59
MgO	0,24	0,36
K ₂ O	Не определялось	0,13
Na ₂ O	То же	0,10
TiO ₂	—"	0,04
Mn	—"	0,74
MnO	0,66	Не определялось
P	0,019	0,15
Cr ₂ O ₃	Не определялось	0,016
V ₂ O ₅	То же	0,04
S _{общ}	0,036	0,21
SO ₃	Не определялось	0,07
S _{сульфид}	То же	0,18
BaO	—"	<0,01
Ni	—"	0,012
Cu	—"	0,03
Zn	—"	0,28
Pb	—"	0,09
As	—"	0,0025
C _{общ}	—"	4,32
C _{тв}	—"	0,82
П.п.п.	—"	16,57

Таким образом, прокатная окалина является менее окисленной, чем шлам. Также следует отметить низкое содержание в прокатной окалине (менее 3 %) соединений, не содержащих железа. В шламе, напротив, содержание CaO доходит до 20,59 %. Кроме того, в прокатной окалине на порядок ниже содержание серы и фосфора — 0,036 и 0,019 % против 0,21 и 0,15 % в шламе соответственно. Однако в шламе содержатся элементы и соединения, являющиеся легирующими при производстве стали. Это соединения марганца, никеля, ванадия, хрома. Также в шламе содержится до 4,32 % углерода общего, в

том числе до 0,82 % твердого углерода. Таким образом, и прокатная окалина, и шлам представляют интерес как оксиджелезосодержащее сырье для процесса металлзации.

Результаты исследования гранулометрического состава окалины и шлама приведены в табл. 2. Из табл. 2 видно, что шлам является более высокодисперсным материалом, чем прокатная окалина.

ТАБЛИЦА 2. ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОКАТНОЙ ОКАЛИНЫ И ШЛАМА

TABLE 2. GRAIN-SIZE COMPOSITION OF ROLLING SCALE AND SLUDGE

Содержание класса крупности, %	Окалина	Шлам
>2,5 мм	24,7	7,4
1,6–2,5 мм	18,3	3,6
1,0–1,6 мм	20,3	3,8
0,63–1,0 мм	6,1	5,6
0,315–0,63 мм	12,3	8,5
0,16–0,315 мм	11,5	6,9
0,10–0,16 мм	3,7	4,0
0,063–0,10 мм	1,5	4,8
0,05–0,063 мм	1,4	1,9
0,032–0,05 мм	0,2	9,0
0,016–0,032 мм	—	22,3
0,008–0,016 мм	—	10,3
<0,008 мм	—	11,9
Итого	100,0	100,0

Преобладающим минералом шлама является магнетит. Также присутствуют гематит, вюстит, кальцит, полевошпат. Полученные данные хорошо согласуются с данными химического анализа. Истинная плотность прокатной окалины составила от 4,6 до 4,9 г/см³, конвертерных шламов — от 3,5 до 5,0 г/см³. Таким образом, плотность прокатной окалины и шлама ККЦ сопоставима.

Проведенный анализ свойств указанного оксиджелезосодержащего сырья позволяет сделать вывод о целесообразности его использования в процессе металлзации. При этом более предпочтительно использование прокатной окалины ввиду большего содержания в ней железа общего.

Выводы

Исследованы химический, фазовый, гранулометрический составы и плотность прокатной окалины и обезвоженных шламов газоочистки кислородно-конвертерного цеха № 1 АО ЕВРАЗ ЗСМК. Содержание железа общего в окалине составляет 73,3 %, в шламе — 41,2 %. При этом содержание FeO и Fe₂O₃ составляет в окалине 75,5 и 20,9 %, в шламе — 4,7 и 53,7 %. Установ-

лено, что в окалине на порядок ниже содержание серы и фосфора — 0,036 и 0,019 % против 0,21 и 0,15 % в шламе соответственно. Шлам содержит также 20,6 % CaO, 4,3 % углерода общего. Гранулометрические составы окалины и шлама существенно отличаются: содержание классов крупности +1,0 мм и –0,016 мм составляет в окалине 63,3 и 0 %, в шламе — 14,8 и 44,5 %. Ис-

тинная плотность окалины составляет 4,6–4,9 г/см³, шлама — 3,5–5,0 г/см³. Полученные результаты подтверждают технологическую целесообразность использования мелкозернистой окалины и порошкообразного шлама в процессах

металлизации, включающих их предварительное брикетирование в смеси с углеродистым восстановителем, например буроугольным полукоксом, поставляемым в виде мелкозернистого продукта класса 0–3 мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. *Металлургия железа: учебник для вузов*. — М.: Metallurgy, 2007. — 320 с.
2. Люнген Х.Б., Петерс М., Шмеле П. Производство чугуна // *Черные металлы*. 2010. № 9. С. 52–66.
3. Рошин В.Е., Рошин А.В. *Электрометаллургия и металлургия стали: учебник для вузов*. — Челябинск: ЮУрГУ, 2013. — 572 с.
4. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Тимофеев Е.С. Экстракция черных металлов из природного и техногенного сырья: учебное пособие для вузов. — Старый Оскол: ТНТ, 2014. — 303 с.
5. Казаков Р.А., Черноусов П.И., Зволинский В.П., Коротченко Н.А. Возможность повышения энергоэффективности при использовании технологий внедоменного получения железа // *Металлург*. 2013. № 2. С. 30–33.
6. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Ходосов И.Е. Прямое получение железа: состояние вопроса, тенденции // *Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XX Междунар. научно-практич. конф. (г. Новокузнецк, 2017 г.)*. — Новокузнецк, 2017. Ч. 1. С. 130–134.
7. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Чичварин А.В. и др. Ресурсосбережение в металлургии прямого восстановления железа // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2014. № 2. С. 35–39.
8. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Rybenko I.A., Khodosov I.E. Energy-efficient reduction of iron from its ores // *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. № 4. P. 237–244.
9. Панишев Н.В., Бигеев В.А., Черняев А.А., Пантелеев А.В. Переработка металлозернистых отходов металлургического производства с получением гранулированного чугуна и извлечением цинка // *Теория и технология металлургического производства*. 2014. № 2 (15). С. 22–26.
10. *Steel Statistical Yearbook 2016*. Brussels: Worldsteel Committee on Economic Studies [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr...fetc.../Steel+Statistical+Yearbook+2016.pdf> (Дата обращения 16.03.2018).
11. Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии: учебное пособие. — Екатеринбург: ООО УИПЦ, 2012. — 670 с.
12. Цирульников Е.В. Новый металлургический завод ООО «НЛМК-Калуга» // *Черные металлы*. 2013. № 9. С. 33–35.
13. Махортова Ю.В., Бондарь А.С. Источники образования и физико-химические свойства отходов прокатного производства [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://masters.donntu.org/2009/fizmet/makhortova/library/article3.htm> (Дата обращения 10.02.2018).
14. Добровольский И.П., Рымарев П.Н., Сафина Т.А. Перспективная технология применения шламов и пыли конвертерного производства // *Вестник Челябинского государственного университета*. 2008. № 17. С. 31–35.
15. Едильбаев А.И., Страхов В.М., Чонин К.Ш. и др. Комплексное исследование углей Казахстана как углеродистого сырья для прямого восстановления железа // *Кокс и химия*. 2013. № 9. С. 20–27.
16. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Hodosov I.E. The use of coal in a solid phase reduction of iron oxide // *JOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015. № 91. P. 1–8.

STUDY OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF IRON OXIDES-CONTAINING MAN-CAUSED RAW MATERIALS

*A. E. ANIKIN, PhD (Tech), Associate Professor, Dpt Metallurgy of non-ferrous metals and chemical technology;
G. V. GALEVSKY, HD (Tech), Professor, Head of Dpt Metallurgy
of non-ferrous metals and chemical technology, kafcmet@sibsiu.ru;
V. V. RUDNEVA, HD (Tech), Professor, Dpt Metallurgy of non-ferrous metals and chemical technology
(Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk)*

Abstract. Results of studies of physical and chemical properties of rolling scale and dewatered sludge from gas-cleaning system of BOF plant quoted, carried out for estimation of technological advisability of application them in metallization processes. The studies carried out by application of standard methodics of determination of chemical, phase, grain-sized contents and density of fine and powder materials. It was determined, that content of total iron, FeO and Fe₂O₃ oxides, Sulphur and Phosphor in the scale makes figures 73.3, 75.5, 20.9, 0.036 and 0.019 % correspondently, in the sludge – 41.2, 4.7, 53.7, 0.21 and 0.15 % correspondently. The sludge contains also up to 20.9% of CAO and 4.3% of total carbon. Grain-size contents of the scale and the sludge are considerably different: content of size grade +1.0 mm and –0.016 mm is in the scale 63.3% and 0%, in the sludge – 14.8 and 44.5 % correspondently. Real density of the scale is 4.6–4.9 g/sm³. The results obtained confirm a technological advisability of application of fine-grained scale and powdered sludge in metallization processes, including their preliminary briquetting comprising carbonic reduction agent.

Key words: rolling scale; sludge of gas-cleaning systems; chemical, phase, grain-sized contents of scale and sludge; briquetting; metallization.

For citation: Anikin A.E., Galevsky G.V., Rudneva V.V. Study of physical and chemical properties of iron oxides-containing man-caused raw materials. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 9, pp. 107–112. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-9-107-112

REFERENCES

1. Yusfin Yu.S., Pashkov N.F. *Metallurgiya zheleza* [Metallurgy of iron: a textbook for high schools]. Moscow: Metallurgiya, 2007, 320 p. (In Russ.).
2. Lyungen X.B., Peters M., Shmele P. Hot metal production. *Cherny'e metally*, 2010, no. 9, pp. 52–66. (In Russ.).
3. Roshhin V.E., Roshhin A.V. *E'lektrometallurgiya i metallurgiya stali* [Electric metallurgy and metallurgy of steel; a textbook for high schools]. Chelyabinsk: YuUrGU, 2013, 572 p. (In Russ.).
4. Timofeeva A.S., Nikitchenko T.V., Timofeev E.S. *E'kstrakciya cherny'x metallov iz prirodnogo i texnogen'nogo sy'r'ya* [Extraction of ferrous metals from natural and man-caused raw materials: a tutorial for high schools]. Staryj Oskol: TNT, 2014, 303 p. (In Russ.).
5. Kazakov R.A., Chernousov P.I., Zvolinskij V.P., Korotchenko N.A. A possibility of increasing energy efficiency during usage of technologies of non-BF iron production. *Metallurg*, 2013, no. 2, pp. 30–33. (In Russ.).
6. Noxrina O.I., Rozhikhina I.D., Xodosov I.E. [Direct reduction of iron: status of the matter, tendencies]. *Metallurgiya: texnologii, innovacii, kachestvo: trudy' XX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Novokuznetsk, 2017)* [Metallurgy: Technologies, Innovations, Quality: Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference (Novokuznetsk, 2017)]. Novokuznetsk, 2017, pp. 130–134. (In Russ.).
7. Timofeeva A.S., Nikitchenko T.V., Chichvarin A.V., Fedina V.V., Timofeeva E.M. Resources saving in metallurgy by direct reduction of iron. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2014, no. 2, pp. 35–39. (In Russ.).
8. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Rybenko I.A., Khodosov I.E. Energy-efficient reduction of iron from its ores. *Steel in Translation*, 2016, vol. 46, no. 4, pp. 237–244.
9. Panishev N.V., Bigeev V.A., Chernyaev A.A., Panteleev A.V. Processing of metal-grained wastes of metallurgical plants resulted in grained cast iron production and zinc extraction. *Teoriya i texnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*, 2014, no. 2 (15), pp. 22–26. (In Russ.).
10. Steel Statistical Yearbook 2016. Brussels: Worldsteel Committee on Economic Studies. Electronic resource. Available at URL: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr...fetc.../Steel+Statistical+Yearbook+2016.pdf> (Accessed 16.03.2018).
11. Yaroshenko Yu.G., Gordon Ya.M., Xodorovskaya I.Yu. *E'nergoe'ffektivny'e i resursosberegayushhie texnologii chernoj metallurgii: uchebnoe posobie* [Energy efficient and resources saving technologies of ferrous metallurgy: tutorial]. Ekaterinburg: OOO UIPCz, 2012, 670 p. (In Russ.).
12. Cirul'nikov E.V. A new steel-works OJSC “NLMK-Kaluga”. *Cherny'e metally*, 2013, no. 9, pp. 33–35. (In Russ.).
13. Maxortova Yu.V., Bondar' A.S. *Istochniki obrazovaniya i fiziko-ximicheskie svoystva otkodov prokatnogo proizvodstva* [Sources of formation and physical and chemical properties of rolling mills wastes]. Electronic resource. Available at URL: <http://masters.donntu.org/2009/fizmet/makhortova/library/article3.htm> (Accessed 10.02.2018). (In Russ.).
14. Dobrovol'skij I.P., Ry'marev P.N., Safina T.A. A perspective technology of utilization of sludge and dust of BOF plant. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2008, no. 17, pp. 31–35. (In Russ.).
15. Edil'baev A.I., Straxov V.M., Chonin K.Sh., Muzgina V.S., Surovceva I.V. A complex study of Kazakhstan coals as carbonic raw materials for direct reduction of iron. *Koks i ximiya*, 2013, no. 9, pp. 20–27. (In Russ.).
16. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Hodosov I.E. The use of coal in a solid phase reduction of iron oxide. *JOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, no. 91, pp. 1–8.