

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Российская академия естественных наук

**ВЕСТНИК
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ СЕКЦИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

Отделение металлургии

Сборник научных трудов

Издается с 1994 г. ежегодно

Выпуск 40

Москва
Новокузнецк
2018

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

В 387

В 387 Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. Вып. 40 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянец (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2018 – 178 с., ил.

Издание сборника статей, подготовленных авторскими коллективами, возглавляемыми действительными членами и членами-корреспондентами РАЕН, других профессиональных академий, профессорами вузов России. Представлены работы по различным направлениям исследований в области металлургии черных и цветных металлов и сплавов, порошковой металлургии и композиционных материалов, физики металлов и металловедения, экономики и управления на предприятиях.

Сборник реферируется в РЖ Металлургия.

Электронная версия сборника представлена на сайте <http://www.sibsiu.ru> в разделе «Научные издания»

Ил. 57, табл. 16, библиогр. назв. 244.

Редакционная коллегия: Аренс В.Ж., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН, вице-президент РАЕН, г. Москва; Райков Ю.Н., д.т.н., д.ч. РАЕН, председатель горно-металлургической секции РАЕН, ОАО «Институт Цветметобработка», г. Москва; Протопопов Е.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (главный редактор), СибГИУ, г. Новокузнецк; Темлянец М.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Галевский Г.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Буторина И.В., д.т.н., проф., СПбГПУ, г. Санкт-Петербург; Волокитин Г.Г., д.т.н., проф., д.ч. МАНЭБ, ТГАСУ, г. Томск; Медведев А.С., д.т.н., проф., д.ч. МАН ВШ, НИТУ «МИСиС», г. Москва; Максимов А.А., д.т.н., проф., г. Новокузнецк; Немчинова Н.В., д.т.н., проф., ИрНИТУ, г. Иркутск; Руднева В.В., д.т.н., проф. (отв. секретарь), СибГИУ, г. Новокузнецк; Спирин Н.А., д.т.н., проф., д.ч. АИН, УрФУ, г. Екатеринбург; Черепанов А.Н., д.ф.-м.н., проф., член РНК ТММ, ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск; Юрьев А.Б., д.т.н., проф., АО «Евраз – ЗСМК», г. Новокузнецк.

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

© Сибирский государственный индустриальный университет, 2018

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ И РУКОВОДИТЕЛЯХ АВТОРСКИХ КОЛЛЕКТИВОВ

Галевский Г.В.	д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Деев В.Б.	д-р техн. наук, проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва
Исмагилов З.Р.	д-р хим. наук, проф., чл.-кор. РАН, ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово
Козырев Н.А.	д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Немчинова Н.В.	д-р техн. наук, проф., ИрНИТУ, г. Иркутск
Руднева В.В.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Соколов А.К.	д-р техн. наук, проф., ИГЭУ, г. Иваново
Темлянцев М.В.	д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Феоктистов А.В.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Шур Е.А.	д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», г. Москва

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	7
<i>А.М. Достоева, Д.У. Смагулов, Н.В. Немчинова</i>	
Исследование фазовых превращений в системе Al-Zr-Fe-Si	8
<i>И.Н. Кель, В.И. Жучков</i>	
Эффективное применение борсодержащих материалов в современных металлургических технологиях	15
<i>А.В. Настюшкина, Е.А. Шевченко, А.А. Шевченко</i>	
Анализ технологии дефосфорации стали в условиях АО «Уральская сталь»	22
<i>С.Н. Анучкин</i>	
Взаимодействие наночастиц ZrO_2 с расплавом никель-олово	25
<i>В.Б. Деев, А.И. Куценко, Е.С. Прусов, С.В. Сметанюк, О.Г. Приходько, К.В. Пономарева, А.А. Сокорев</i>	
Определение доли твердой фазы по данным компьютерного термического анализа процесса кристаллизации расплава	34
<i>Г.Е. Левшин</i>	
Многовариантный подход к расчету параметров магнитопроводов индукционных тигельных печей	40
<i>О.В. Кузнецова, М.В. Темлянцев, Е.Н. Темлянцева</i>	
К вопросу об учете неравномерности перемещения заготовок при математическом моделировании процессов нагрева металла в методических печах	49
<i>С.А. Кондрашов, Э.М. Голубчик, Т.Ю. Мартынова</i>	
Новая технология производства холоднокатанного металла в условиях стана 2500	53
<i>Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Р.Е. Крюков</i>	
Совершенствование технологии электроконтактной сварки и термообработки железнодорожных рельсов	63
ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	69
<i>А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, И.В. Ноздрин</i>	
Физико-химическая аттестация железосодержащего техногенного сырья	70
<i>А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Н.М. Кулагин, В.В. Васильев, Г.Н. Черновский</i>	
Природные твердые углеродистые материалы в современной металлургии: виды, свойства, применение	78

<i>А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Н.М. Кулагин, В.В. Васильев, Г.Н. Черновский</i>	
Искусственные твердые углеродистые материалы в современной металлургии	89
ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ	98
<i>А.А. Иванов, Т.Н. Осколкова</i>	
Вакуумная термическая обработка стали 30ХГСА	99
<i>Е.С. Прусов, Д.А. Ткач, В.Б. Деев, Е.М. Рахуба</i>	
Количественный анализ структуры композиционных сплавов с применением программы ImageJ	106
<i>В.А. Кузнецов, Р.А. Шевченко, А.А. Усольцев, Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков</i>	
Методика определения электрического сопротивления рельсовой стали	111
<i>Е.А. Шур, В.Н. Цвигун, Р.С. Койнов</i>	
Модели образования фрактографических рельефов на усталостных трещинах	118
ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ..	136
<i>А.В. Феоктистов, О.Г. Приходько, К.В. Пономарева, С.В. Морин, О.В. Гордеева</i>	
Применение подходов проектного менеджмента при производстве рельсовой продукции на АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	137
<i>Л.Б. Павлович, З.Р.Исмагилов, К.А. Дятлова</i>	
Оценка каталитических свойств отвального силикомарганцевого шлака Кузбасса	139
<i>А.К. Соколов</i>	
Повышение эффективности энергосбережения при эксплуатации многозонных проходных печей	147
<i>А.И. Куценко, Е.Г. Лашкова</i>	
Корпоративная идентификация бизнеса как составляющая стратегического репутационного развития организации	154
ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ	169
<i>Ю.К. Осипов, О.В. Матехина</i>	
Архитектурное проектирование как образовательный процесс	170
К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ	176

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

В данной работе проведено исследование физико-химических характеристик прокатной окалины и обезвоженного шлама газоочистки кислородно-конвертерного производства для оценки технологической целесообразности применения их в процессах металлзации.

In this work the research of physical and chemical characteristics of rolling scale and the dehydrated slime of gas purification of oxygen and converter production for assessment of technological expediency of their application in metallization processes is conducted.

Введение

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

1) Получение частично металлзованных материалов для доменных печей.

2) Получение металлзованного продукта (губчатого железа) в твердом виде для переплавки в сталеплавильных агрегатах (температура 500-1000 °С).

3) 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).

4) 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].

Металлизация мелкозернистых и порошкообразных оксиджелезосодержащих отходов является важным направлением в металлургии. По данным Всемирной ассоциации производителей стали (World Steel Association) [10] производство железа прямого восстановления за последние 10 лет выросло в мире на 18 %, в России – на 66 %, что говорит о чрез-

вычайно динамическом развитии данного направления. Особенно актуальной металлизация 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 количеством мини-заводов в мире – порядка одной тысячи [11], и, соответственно, значительным объемом образования оксиджелезосодержащих отходов. По прогнозам, в 2020 году более 50 % мирового производства стали будет обеспечено именно мини-заводами. На территории бывшего СССР уже построено 7 мини-заводов: в России (Комсомольск-на-Амуре, Калуга, Саратовская, Ростовская и Тюменская области), в Белоруссии (Жлобин) и в Молдавии (Кишинев) [11, 12].

Для исследования процессов металлизации 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 рядом авторов [13-16], но приведенные данные либо противоречивы, либо недостаточно полны.

Цель исследования

Целью настоящей работы является исследование физико-химических характеристик прокатной окалины и обезвоженного шлама газоочистки кислородно-конвертерного производства (химического, гранулометрического и фазового составов, плотности) – 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 окалины (2,5-3,0 %) [8]. По данным Всемирной ассоциации производителей стали (World Steel Association) [5], в мире ежегодно образуется до 50 млн. т прокатной окалины, в России – до 1,5 млн. т. На площадке строительного проката АО «ЕВРАЗ ЗСМК» за год образуется примерно 200 тыс. т прокатной окалины. По данным [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 окалины.

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

1) Окалина первичных отстойников. Окалина является продуктом окисления наружного слоя раскаленного металла. Как правило, технологи-

ческая 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 окалина. Отделение окалины производится по всей технологической линии. После нагрева в печи или колодце слиток поступает на приемный рольганг, где предусмотрен отбойник окалины. Окалина удаляется также гидросбивом, паровзрывным способом, окалиноломателями. Вся отделенная окалина поступает в подстановый тоннель и транспортируется водой в первичный отстойник окалины, расположенный в цехе и представляющий собой железобетонный колодец прямоугольной формы с двумя рукавами — подводящим и отводящим. В отстойнике осаждаются наиболее крупные частицы окалины размером до 2,5 мм при среднем диаметре частиц 0,5-0,7 мм. Частицы окалины 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 окалине обнаруживаются нефтепродукты, что отрицательно влияет на дальнейшую ее утилизацию. В этой окалине содержится до 1,74-3,8 % масел. Из первичного отстойника окалина отгружается грейферным краном в вагоны.

2) Окалина вторичных отстойников. После первичных отстойников вода с мелкими частицами окалины (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. Окалина 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 %. Окалина из отстойника отбирается грейферным краном. Часть более крупной окалины отбирается из карманов секций и складывается на специальную площадку для подсушивания. По мере поступления вагонов она отгружается потребителям. Содержание нефтепродуктов в этой окалине составляет 1,8 %. Другая часть более мелкой окалины с содержанием нефтепродуктов до 15 % складывается в бетонном бункере и периодически вывозится в отвал.

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

Шламы кислородно-конвертерного производства образуются при мокрой газоочистке конвертерных газов. Шламы относятся к богатым ($Fe_{общ} = 55 \div 67 \%$) или относительно богатым железом ($Fe_{общ} = 40 \div 55 \%$). При мокрой газоочистке образуется 10-30 кг шламов на 1 т выплавляемой

стали (1-3 %) [9]. Следовательно, в мире образуется примерно 14,0 – 38,0 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 шлака 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 шлака в барабанной вращающейся печи, схема с обработкой шлака азотнокислым отработанным травильным раствором на станции нейтрализации, а также комбинированная двухстадийная схема с твердофазной металлизацией и удалением цинка из шлака и дальнейшее жидкофазное восстановление частично металлизированного полупродукта. Но некоторые металлургические комбинаты, в частности АО «ЕВРАЗ ЗСМК», часть шлака сбрасывают в шламохранилища. Так, в шламохранилище АО «ЕВРАЗ ЗСМК» накоплено около 2,7 млн. т железа в составе железосодержащих шлаков.

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:

- 1) 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 $\alpha > 1$;
- 2) системы, работающие без доступа воздуха в газовый тракт и без дожигания оксида углерода, т.е. при $\alpha < 0,15$;
- 3) 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 общего железа.

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.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты определения химического состава прокатной окалины и шлама приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что прокатная окалина имеет большее содержание железа общего (73,3 %), чем шлам ККЦ-1 (41,18 %). Следует отметить, что содержание железа общего в шламе 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 %.

Таким образом, прокатная окалина является менее окисленной, чем шлам. Также следует отметить низкое содержание в прокатной окалине (менее 3 %) соединений, не содержащих железо. 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 % соответственно против 0,21 % и 0,15 % в шламе. 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 % общего углерода, 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 таблице 2. Из таблицы 2 видно, что шлам является более высокодисперсным материалом, чем прокатная окалина.

Таблица 1 – Химический состав прокатной окалины и шлама

Химический состав, %	Окалина	Шлам
Fe _{общ.}	73,30	41,18
Fe _{привед.}	Не опр.*	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 опр.	0,13
Na ₂ O	То же	0,10
TiO ₂	»	0,04
Mn	»	0,74
MnO	0,66	Не опр.
P	0,019	0,15
Cr ₂ O ₃	Не опр	0,016
V ₂ O ₅	То же	0,04
S _{общ.}	0,036	0,21
SO ₃	Не опр.	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
* Не определялось		

Преобладающим минералом шлама является магнетит. Также присутствуют гематит, вюстит, кальцит, полевои шпат. 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 металлизации. При этом более предпочтительно использование прокатной окалины ввиду большего содержания в ней общего железа.

Таблица 2 – Гранулометрический состав прокатной окалины и шлама

Содержание класса крупности, %	Окалина	Шлам / Slime
> 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

Выводы

Исследованы химический, фазовый, гранулометрический составы и плотность прокатной окалины и обезвоженных шламов газоочистки кислородно-конвертерного цеха № 1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Содержание общего железа 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 %. Установлено, что в окалине на порядок ниже содержание серы и фосфора – 0,036 % и 0,019 % соответственно против 0,21 % и 0,15 % в шламе. Шлам содержит также 20,6 % CaO, 4,3 % общего углерода. 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 %. Истинная 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа : учеб. для вузов. М.: Металлургия, 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 : учеб. 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 : учеб. пособие для вузов. Старый Оскол : ТНТ, 2014. 303 с.

5. Казаков Р.А. [и др.] 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 Международной научно-практической конференции (г. Новокузнецк, 2017 г.). Новокузнецк, 2017. Ч. 1. С. 130-134.

7. Тимофеева А.С. [и др.]. Ресурсосбережение в металлургии прямого восстановления железа // Бюллетень «Черная металлургия». 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. Pp. 237-244.

9. Панишев Н.В. [и др.]. 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]. URL: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr...fetc.../Steel+Statistical+Yearbook+2016.pdf>. (16.03.2018).

11. Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии : учеб. 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]. URL: <http://masters.donntu.org/2009/fizmet/makhortova/library/article3.htm>. (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. [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. No. 91 Pp. 1-8.