

ЧЕРНЫЕ металлы

№ 1 (1069), январь 2021 г. Издаётся с 1961 г.

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения

**Российскому научно-исследовательскому
институту трубной промышленности —
60 лет**




<h1>Черные металлы</h1>	Издательский дом «Руда и Металлы»
№ 1 (1069), январь 2021 г.	Издается с 1961 г.

**Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения**

Учредители:		
Акционерное общество «Издательский дом «Руда и Металлы»»	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»»	Федеральное бюджетное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»
При участии:		
ПАО «ММК» ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК» Государственного Эрмитажа Журнала «Stahl und Eisen»	Официальный информационный орган Федерального УМО «Технологии материалов»	

Редакционный совет: Председатель редакционного совета: О. Н. Сосковец Главный редактор: В. М. Колокольцев Первый зам. главного редактора: К. Л. Косырев Зам. главного редактора: А. Г. Воробьев, Е. В. Цирульников А. М. Беленький, В. Блек (Германия), Ю. Л. Бобарикин (Беларусь), О. И. Борискин, И. В. Буторина, Р. М. Валеев, Е. П. Волюнкина, А. В. Выдрин, С. П. Галкин, Е. А. Голи-Оглу (Дания), Я. М. Гордон (Канада), В. Я. Дашевский, Д. Г. Еланский, Н. А. Зюбан, В. П. Иващенко (Украина), И. Е. Илларионов, Л. М. Капуткина, А. А. Казаков, А. П. Коликов, А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарев, И. О. Леушин, В. А. Луценко (Украина), И. П. Мазур, Ю. Ю. Пиотровский, А. Н. Савенок (Беларусь), А. В. Серебряков, И. А. Султангузин, С. С. Ткаченко, А. Я. Травянов, Н. А. Чиченев, М. В. Чукин, П. Шеллер (Германия), Е. А. Яценко
Редакция: Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников Ответственный секретарь: Е. Ю. Рахманова Редактор Г. Е. Форысенкова Набор: Л. М. Чичерина Перевод: Ю. А. Платонов Ответственный за предпечатную подготовку издания: И. Г. Иваньшина

<p>Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»» Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., 6, стр. 2, МИСиС, оф. 622</p> <p>Адрес редакции: • фактический: 119049, Москва, Ленинский проспект 6, стр. 2, МИСиС, оф. 617 • почтовый: 119049, Москва, а/я № 71 Телефон/факс: (495) 955-01-75 Эл. почта: chernet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru www.rudmet.ru</p>	<p>Ежемесячный научно-технический и производственный журнал по актуальным проблемам металлургии и машиностроения «Черные металлы» № 1 (1069) январь 2021 г. Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство ПИ № ФС77-48681 от 28.02.2012 г.) Товарный знак и название «Черные металлы» являются исключительной собственностью Издательского дома «Руда и Металлы» Отпечатано с предоставленных готовых файлов в типографии «Канцлер» 150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16. стр. 66А. Тел. (4852) 58-76-33. Выход из печати 02.02.2021. Формат 60×90/8. Печ. л. 10. Офсетная печать. Бумага офсетная. Тираж 1000 экз. Цена свободная</p>	<p>За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции При перепечатке ссылка на «Черные металлы» обязательна «Реклама» — материал публикуется на правах рекламы Публикуемые материалы не обязательно отражают точку зрения редакции и редсовета журнала</p>
		<p>ISSN 0132-0890</p>  <p>7 770132 089006 ></p>
		<p>Подписной индекс: 12985 «Пресса России»</p>

СОДЕРЖАНИЕ

Производство чугуна и стали

- Р. Р. Дема, А. Н. Шаповалов, С. Н. Басков.* Влияние расхода окатышей различной основности на показатели доменной плавки 4
- В. Н. Лавров, С. А. Ботников, А. В. Косоногов, С. А. Сомов.* Влияние геометрии сталевыпускного отверстия дуговой печи на производственные показатели литейно-прокатного комплекса АО «ВМЗ» . . . 11
- А. Ю. Третьяк, Цян Ван, Чун-Лей Ву, Е. И. Шифрин.* Влияние конфигурации внутреннего канала погружного стакана и электромагнитного воздействия в пределах его длины на качественное распределение потоков металла при непрерывной разливке стали 17

Литейное производство

- В. А. Гулевский, С. Н. Цурихин, В. В. Гулевский, Н. Ю. Мирошкин.* Исследование влияния модифицирования на эксплуатационные свойства чугуна изложниц 23

60 лет ОАО «РосНИТИ»

- И. Ю. Пышминцев.* Российскому научно-исследовательскому институту трубной промышленности — 60 лет 29
- В. И. Кузнецов.* Достижения отдела разработки новой продукции, сопутствующих технологий и материалов ОАО «РосНИТИ» 35
- Д. А. Ахмеров, А. В. Выдрин.* Исследование процесса образования концевых участков труб при продольной прокатке в калибрах, образованных разным числом валков 44
- Р. В. Сулягин, М. Н. Мозжегоров, А. О. Струин, А. Г. Варнак.* Повышение качественных показателей электросварных труб из стали группы прочности K55 49

Термообработка

- С. Е. Крылова, Е. В. Ромашков.* Особенности термической обработки новой стали для изготовления штампов горячего деформирования. 54

Металловедение и металлография

- С. В. Давыдов.* Перитектоидное карбидное превращение на основе ϵ -карбида Fe_2C в сплавах системы Fe – C. Часть 2. Металлографические исследования 61

Порошковая металлургия

- А. В. Агаповичев, В. В. Кокарева, В. П. Алексеев, В. Г. Смелов.* Исследование структуры и механических свойств образцов, полученных технологией селективного лазерного сплавления из порошка жаропрочного сплава Inconel 738 67
- Тиен Хиеп Нгуен, Ван Мин Нгуен.* Кинетика процесса получения нанопорошка железа химико-металлургическим методом при изотермических условиях 72

Благодарности

- Коллеги — о плодотворном сотрудничестве с журналом «Черные металлы» 78

Журнал «Черные металлы» по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» по металлургии

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Chemical Abstracts Service

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Scopus, II квартиль (2019) (по версии SCIMAGO)

Журнал «Черные металлы» входит в состав базы Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science

ВЛИЯНИЕ РАСХОДА ОКАТЫШЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ОСНОВНОСТИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Р. Р. ДЕМА, А. Н. ШАПОВАЛОВ, С. Н. БАСКОВ*

Приведены результаты анализа производственных данных о работе доменной печи (ДП) № 1 (полезный объем 1007 м³) АО «Уральская Сталь» за период с 2013 по 2018 г., в течение которого использовали окатыши Михайловского ГОКа с различной степенью офлюсования: окатыши естественной основности по отношению CaO/SiO₂, равной 0,08±0,02 ед. (2013–2015 гг.), и частично офлюсованные окатыши с основностью 0,52±0,05 ед. (с 2016 г. по настоящее время).

Установлено, что эффективность использования окатышей различной основности определяется их поведением в ДП и зависит от доли окатышей в железорудной части шихты. С увеличением доли окатышей в шихте газодинамические условия плавки ухудшаются, что сопровождается ростом удельных потерь напора и вынуждает корректировать расход дутья. Для условий работы ДП № 1 АО «Уральская Сталь» существует оптимальный уровень удельных потерь напора (53–55 Па на 1 м³ дутья в минуту), при котором обеспечивается оптимальное сочетание показателей плавки. Отклонение от оптимального уровня потерь напора ведет к повышению расхода кокса и снижению степени использования СО, что связано с нарушением рационального газораспределения.

Из-за повышения высокотемпературных свойств замена нефлюсованных окатышей на офлюсованные способствует улучшению газодинамических условий в нижней части шахты (в зоне когезии), что ведет к снижению общего перепада давлений и удельных потерь напора при постоянном расходе дутья и является резервом интенсификации плавки.

Для минимизации расхода кокса и высокопроизводительной работы ДП АО «Уральская Сталь» необходимо использовать 40–45 % офлюсованных или 20–25 % кислых окатышей в шихте. Повышение расхода окатышей при сохранении эффективности доменной плавки возможно только при улучшении их высокотемпературных свойств в результате оптимизации основности и повышения содержания MgO, влияющего на структуру и свойства силикатной связки.

Ключевые слова: доменная плавка, расход окатышей, нефлюсованные окатыши, офлюсованные окатыши, производительность, удельный расход кокса, общий перепад давления, расход дутья.

DOI: 10.17580/chm.2021.01.01

Обзор проблемы и цель исследования

Поведение материалов в ДП и, следовательно, технико-экономические показатели доменной плавки, во многом определяются совокупностью металлургических свойств используемого железорудного сырья [1–6], в качестве которого традиционно применяют агломерат и окатыши.

Благодаря своей неправильной форме агломерат обеспечивает значительно более высокий объем межкусковых промежутков, имеет большую пористость и удельную поверхность [5–8], что повышает эффек-

тивность использования газа в ДП. Известными его недостатками являются разупрочнение при охлаждении (из-за полиморфного превращения двухвалентного силиката [2, 7, 9, 10]) или неполного усвоения CaO (в результате его гидратации в атмосферных условиях), а также необходимость включения в состав аглошихты зернистых руд [2, 7], что снижает содержание железа в агломерате.

Железорудные окатыши отличаются повышенным содержанием железа и стойкостью к разрушению при транспортировании и длительном хранении [2, 11], однако их использование в доменной плавке осложняется рядом причин [12–18]:

- разбуханием и растрескиванием с образованием мелочи при восстановлении;
- низкой температурой начала размягчения и широким интервалом размягчения и плавления;
- слипанием окатышей в «гроздь», ухудшающим газодинамику доменной плавки;
- абразивным и химическим воздействием на огнеупорную кладку печи.

Поэтому в зависимости от химического и минералогического состава окатышей в каждом конкретном случае подбирают их оптимальное соотношение в шихте с агломератом [16, 19], при котором обеспечиваются наилучшие показатели доменной плавки.

* ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия:

канд. техн. наук Р. Р. Дема, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения;

Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия: канд. техн. наук А. Н. Шаповалов, доцент, заведующий кафедрой металлургических технологий и оборудования;

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет», Челябинск, Россия:

канд. техн. наук С. Н. Басков, доцент кафедры «Мехатроника и автоматизация»;

Эл. почта: demarr78@mail.ru; alshapo@misis.ru; sbaskov@mail.ru

В ДП АО «Уральская Сталь» в качестве основных железорудных материалов используют продукты окускования руд и концентратов Курской магнитной аномалии: агломерат собственного производства и окатыши Михайловского ГОКа (МГОК). При этом в зависимости от условий поставки окатышей и технических возможностей агломерационного цеха среднемесячные показатели по доле окатышей в шихте варьируются от 15 до 55 %. С 2016 г. для улучшения металлургических свойств окатышей и повышения их расхода в доменной шихте МГОК перешел на производство частично офлюсованных окатышей с основностью 0,5 ед. (по отношению CaO/SiO_2), что позволяет провести анализ влияния расхода и состава окатышей на показатели доменной плавки.

Целью настоящего исследования является изучение влияния расхода окатышей различной основности на показатели доменной плавки и установление рациональных условий использования окатышей МГОКа различной степени офлюсования.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование проводили по производственным данным о работе ДП № 1 (полезный объем 1007 м³) АО «Уральская Сталь» за период с 2013 по 2018 г., в течение которого использовали окатыши с различной степенью офлюсования. Усредненные данные

о химическом составе офлюсованных и неофлюсованных окатышей МГОКа (по данным технических отчетов), применяемых в исследуемый период, представлены в **табл. 1**.

Неофлюсованные окатыши с естественной основностью по отношению CaO/SiO_2 $0,08 \pm 0,02$ ед. поставляли до 2015 г. включительно, а с 2016 г. ДП АО «Уральская Сталь» работают с использованием частично офлюсованных окатышей с основностью $0,52 \pm 0,05$ ед. Основные показатели работы ДП № 1 за исследуемые периоды работы на неофлюсованных (2013–2015 гг.) и частично офлюсованных (2016–2018 гг.) окатышах приведены в **табл. 2**.

Таблица 1
Химический состав окатышей МГОКа

Компоненты	Содержание по видам окатышей, %			
	Неофлюсованные		Офлюсованные	
	Интервал	Среднее	Интервал	Среднее
Fe	62,8–64,2	63,4	59,4–61,1	60,3
CaO	0,57–0,88	0,68	3,62–4,74	4,17
SiO ₂	7,7–8,6	8,3	6,5–8,7	8,1
Al ₂ O ₃	0,1–0,39	0,20	0,12–0,36	0,22
MgO	0,3–0,73	0,47	0,38–0,73	0,54
S	0,005–0,057	0,008	0,005–0,024	0,009
P ₂ O ₅	0,02–0,044	0,031	0,010–0,068	0,034

Таблица 2
Усредненные показатели работы ДП № 1

Параметр	Значение показателей за период*	
	2013–2015 гг.	2016–2018 гг.
Вид окатышей МГОКа	Неофлюсованные	Офлюсованные
Основность окатышей	0,06–0,10 / 0,08	0,47–0,59 / 0,52
Доля окатышей в шихте, %	17,9–41,9 / 28,6	35,4–49,9 / 44,5
Производительность, т/сут: фактическая	1572–2009 / 1840	1596–2105 / 1843,9
приведенная**	1696–1916 / 1814,0	1589–1962 / 1784,1
Расход кокса, кг/т: фактический	460,0–492,8 / 476,2	456,6–4847,3 / 469,3
приведенный**	452,1–509,0 / 479,8	452,2–508,1 / 480,9
Прочность кокса по М25, %	81,7–86,5 / 83,3	80,8–85,7 / 83,8
Содержание железа в рудной части, %	53,60–55,54 / 54,70	53,57–55,16 / 54,30
Выход шлака кг/т чугуна	346,5–420,0 / 393,6	350,0–416,0 / 393,0
Дутье:		
расход, м ³ /т	1789–2010 / 1911,0	1663–2094 / 1890,4
давление, атм	1,89–2,29 / 2,09	1,65–2,06 / 1,93
температура, °С	1036–1129 / 1088	996–1176 / 1114
содержание кислорода, %	21,0–26,6 / 24,1	21,6–28,8 / 24,6
Расход природного газа, м ³ /т	58,0–119,5 / 86,1	51,4–120,3 / 87,0
Общий перепад давления, атм.	0,93–1,24 / 1,09	0,93–1,09 / 0,98
Удельные потери напора $\Delta P/Q_d$, (Па·мин)/м ³	51,44–68,04 / 58,31	48,97–57,64 / 52,80
Степень использования CO, %	43,9–45,3 / 44,6	43,7–44,6 / 44,1
Содержание Si в чугуне, %	0,56–0,67 / 0,60	0,49–0,59 / 0,55
CaO/SiO ₂ в шлаке	1,002–1,107 / 1,062	1,030–1,113 / 1,073

*В числителе минимальное и максимальное значения, в знаменателе — среднее.
**Приведенные к условиям работы печи в январе 2013 г.

В исследуемый период ДП № 1 работала без аварий и длительных простоев со стабильным режимом загрузки (2РРКК↓ 3КРРК↓ 1,25 м), относительно стабильным шлаковым режимом и тепловым состоянием. При этом технологические параметры и показатели качества шихты в исследуемые периоды (см. табл. 2) изменялись в достаточно широких пределах, оказывая влияние на результаты доменной плавки. Поэтому влияние вида и расхода окатышей оценивали не только по фактической производительности и расходу кокса, но и по «приведенным» показателям, учитывающим различия в условиях плавки в сравниваемые периоды.

Данные по производительности и удельному расходу кокса при работе печи на офлюсованных окатышах оказались лучше, чем в период использования неофлюсованных окатышей. Однако сравнение «приведенных» результатов, учитывающих неодинаковые условия доменной плавки, показывает, что технико-экономические показатели работы ДП № 1 на офлю-

сованных окатышах уступают аналогичным результатам, достигнутым в период применения неофлюсованных окатышей. Подобный результат, очевидно, связан с нерациональным сочетанием параметров загрузки (соотношения в шихте агломерата и окатышей), шлакового и дутьевого режимов плавки, применяемых в период работы на офлюсованных окатышах.

Влияние расхода окатышей с разной степенью офлюсования на производительность ДП № 1 показано на рис. 1. Несмотря на рост фактической производительности, «приведенная» производительность имеет экстремальную зависимость от доли окатышей, достигая максимальных значений при доле неофлюсованных и офлюсованных окатышей в шихте 25–27 и 43–45 % соответственно. Установленные зависимости проявляются, несмотря на увеличение содержания железа в шихте (рис. 2), что, вероятно, связано с ухудшением газодинамических условий работы печи с повышением расхода окатышей. В качестве

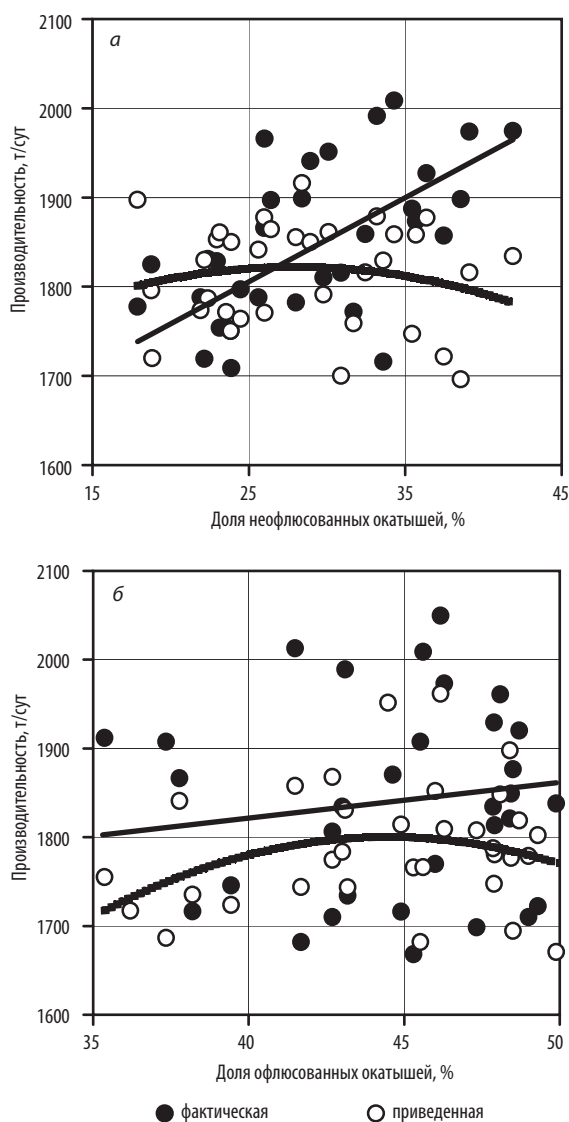


Рис. 1. Влияние доли неофлюсованных (а) и офлюсованных (б) окатышей в шихте на производительность ДП № 1

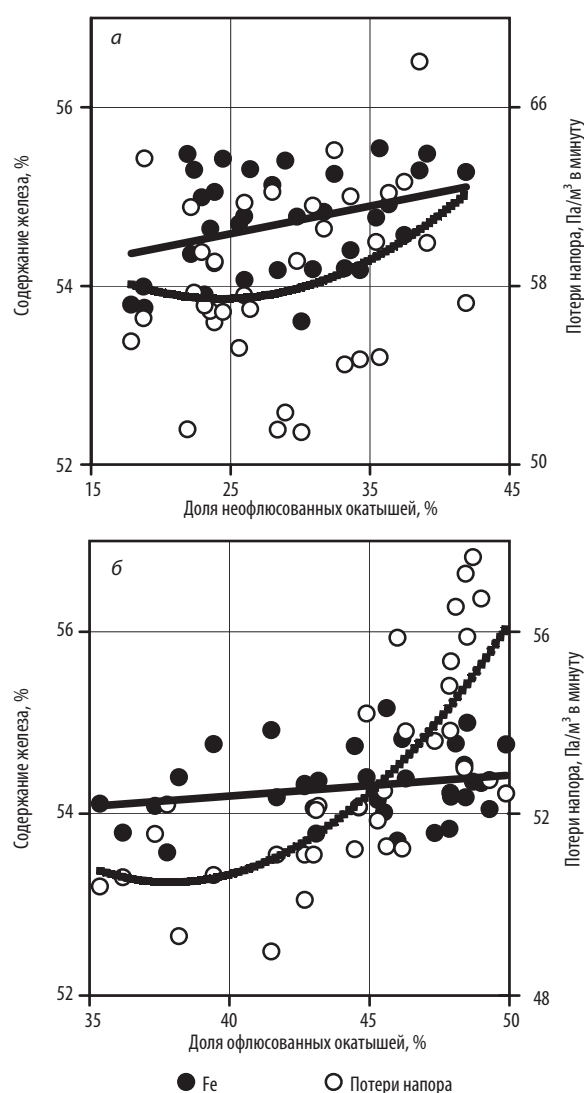


Рис. 2. Влияние доли неофлюсованных (а) и офлюсованных (б) окатышей в шихте на содержание железа (Fe) в шихте и удельные потери напора

комплексного критерия газодинамических условий доменной плавки использовали величину общих потерь напора по высоте столба шихты (Па), приходящихся на 1 м³/мин дутья (далее удельные потери напора — $\Delta P/Q_d$, Па·мин/м³). Удельные потери напора в столбе шихты повышаются с увеличением расхода как неофлюсованных, так и офлюсованных окатышей. Однако особенно интенсивный рост $\Delta P/Q_d$ наблюдается с повышением доли неофлюсованных окатышей более 30–35 %, а для офлюсованных — более 45 %. При этом удельные потери напора при работе на неофлюсованных окатышах существенно превышают аналогичные показатели с использованием офлюсованных окатышей, что свидетельствует о более благоприятном поведении офлюсованных окатышей в печи.

Вышеуказанные наблюдения согласуются с закономерностями влияния расхода окатышей с различной степенью офлюсования на удельный расход кокса (рис. 3).

С повышением расхода неофлюсованных окатышей до 35 % наблюдалось снижение фактического расхода скипового кокса, однако «приведенный» расход кокса показывает обратный тренд, особенно при увеличении доли окатышей сверх 25–30 % (см. рис. 3, а). Влияние расхода офлюсованных окатышей на удельный расход кокса по фактическим и «приведенным» данным идентично и позволяет заключить, что минимальный расход кокса достигается при содержании офлюсованных окатышей в железорудной части шихты на уровне 43–45 %. Наиболее вероятным объяснением отмеченных закономерностей является динамика потерь напора по высоте столба шихты с ростом расхода окатышей (см. рис. 2), согласно которой заметное ухудшение газодинамических условий доменной плавки (рост удельных потерь напора) наблюдается с повышением доли неофлюсованных и офлюсованных окатышей сверх 25 и 40 % соответственно. Это еще раз подтверждает определяющую для результатов доменной плавки роль организации противотока шихты и газов в печи, совершенствование которого предполагает обязательный учет качества шихтовых материалов, в частности высокотемпературных свойств железорудных материалов.

Как известно, офлюсованные окатыши имеют повышенную в сравнении с неофлюсованными температуру начала размягчения и плавления, а также более узкий диапазон плавления, что приближает их поведение к агломерату и облегчает газодинамические условия в нижней части шахты (в зоне когезии). Поэтому переход от неофлюсованных окатышей к офлюсованным обеспечивает снижение общего перепада давления и удельных потерь напора при постоянном расходе дутья (см. табл. 1), что дает возможность для выравнивания распределения рудной

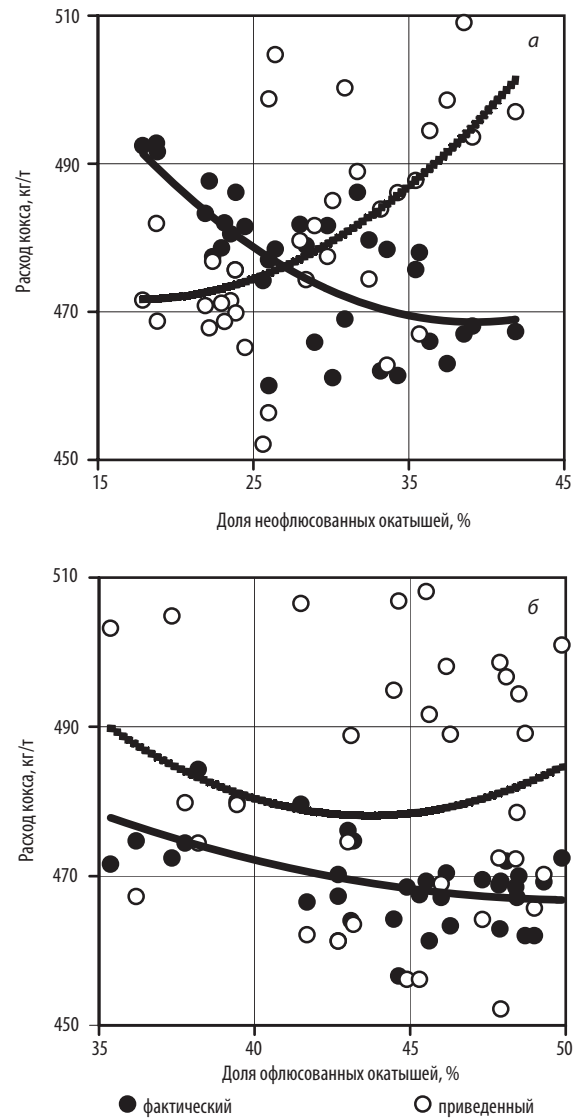


Рис. 3. Влияние доли неофлюсованных (а) и офлюсованных (б) окатышей в шихте на удельный расход кокса

нагрузки по радиусу печи или повышения расхода дутья [20–22].

Из рис. 4, а следует, что для условий работы ДП № 1 АО «Уральская Сталь» существует оптимальный уровень потерь напора, при котором наблюдается минимальный расход кокса (53–55 Па·мин/м³) в результате улучшения использования химической энергии газового потока (см. рис. 4, б).

Сопоставление данных по удельным потерям напора за анализируемые периоды показывает, что при использовании неофлюсованных окатышей печь работала в неблагоприятных газодинамических условиях (средняя величина потерь напора 58,31 Па·мин/м³), которые особенно ухудшаются с ростом доли окатышей более 25 %. При использовании офлюсованных окатышей, наоборот, фактические потери напора (52,8 Па·мин/м³) находятся на нижнем уровне оптимального диапазона, что говорит о недостаточной

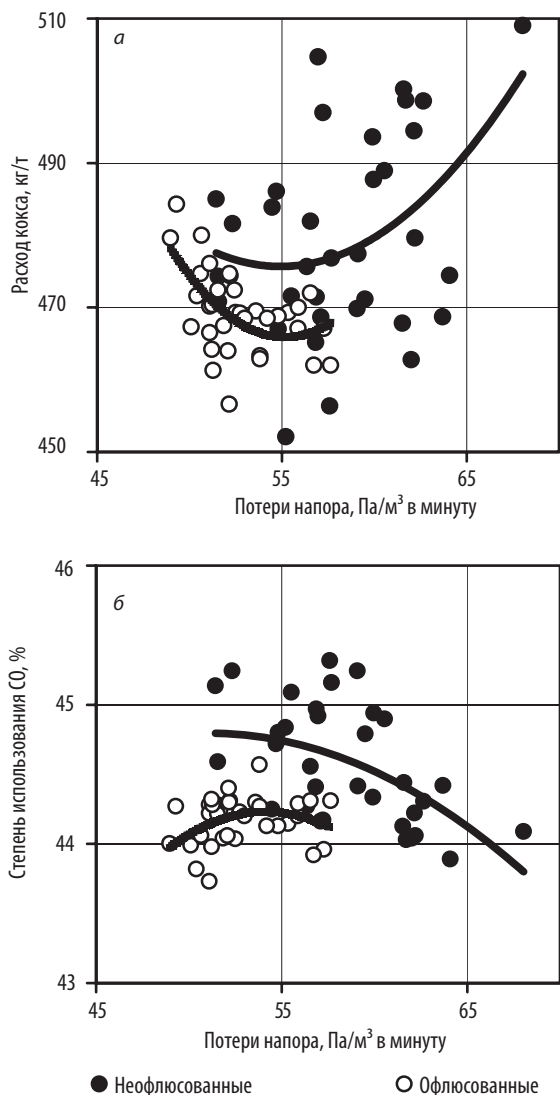


Рис. 4. Взаимосвязь удельных потерь напора с расходом кокса (а) и степенью использования монооксида углерода (б)

степени форсирования доменной плавки в этом периоде. Последнее во многом объясняет более низкие показатели по использованию восстановительной энергии газа при использовании офлюсованных окатышей в сравнении с нефлюсованными (см. рис. 4, б).

Имеющиеся дополнительные возможности по форсированию плавки при работе на офлюсованных окатышах подтверждаются динамикой общего перепада давления в печи и удельных потерь напора с повышением расхода дутья (рис. 5).

Как следует из данных рис. 5, а, с повышением расхода дутья общий перепад давления в печи при работе на нефлюсованных окатышах повышается в два раза интенсивнее, чем при использовании офлюсованных окатышей. Аналогичным образом изменяются и удельные потери напора (см. рис. 5, б), что подтверждает наличие резервов по повышению интенсивности плавки при работе на офлюсованных окатышах. С учетом ранее установленного

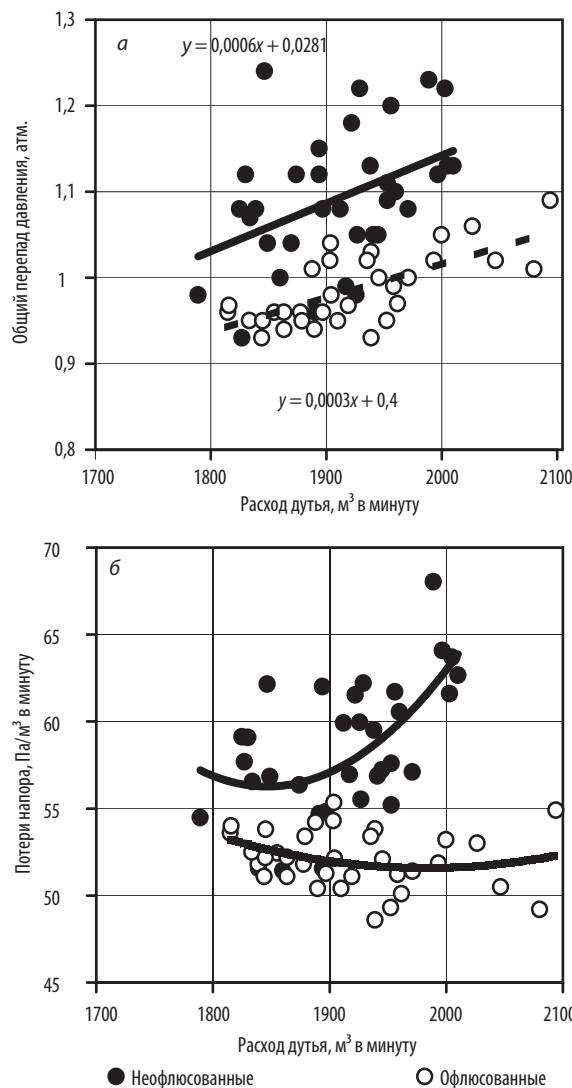


Рис. 5. Зависимость общего перепада давления (а) и удельных потерь напора (б) от расхода дутья

оптимального диапазона удельных потерь напора (53–55 Па·мин/м³) и рационального уровня общего перепада давления в печи 1,05–1,10 атм. для повышения эффективности доменной плавки при использовании офлюсованных окатышей (до 45 % в железорудной части шихты) необходимо работать с расходом дутья в диапазоне 2000–2100 м³/мин (при неизменных других действующих параметрах дутья). Для достижения аналогичной интенсивности дутья при работе на нефлюсованных окатышах их расход необходимо ограничивать — не более 25 % от расхода железорудных материалов.

Заключение

Для минимизации расхода кокса и высокопроизводительной работы ДП № 1 АО «Уральская Сталь» необходимо использовать 40–45 % офлюсованных и не более 25 % кислых окатышей в шихте при рас-

ходе дутья на уровне 2000–2100 м³/мин и сохранении других параметров дутья на текущих уровнях (см. табл. 2). Рекомендации по оптимальной доле окатышей в шихте можно использовать и для других ДПАО «Уральская Сталь». Повышение расхода окатышей при сохранении эффективности доменной плавки возможно только при улучшении их термопластичных свойств в результате оптимизации основности и повышения содержания MgO, влияющего на структуру и свойства силикатной связи агломерата и окатышей [23–30].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZRU-2020-0011).

Библиографический список

- Курунов И. Ф. Доменный процесс — есть ли альтернатива? // *Металлург*. 2012. № 4. С. 40–44.
- Металлургия чугуна : учеб. для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. / под ред. Ю. С. Юсфина. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. — 774 с.
- Gao Q., Shen Y., Wei G., Jiang X., Shen F. Diffusion behavior and distribution regulation of MgO in MgO-bearing pellets // *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2016. Vol. 23, Iss. 9. P. 1011–1018.
- Puzakov P. V., Kozub A. V., Ugarov A. A., Efendiev N. T., Lavrinenko A. A. et al. Technological parameters determining physical-chemical properties and required quality of green pellets at the roasting machine No. 3 of PJSC «Mikhailovsky GOK» // *CIS Iron and Steel Review*. 2017. Vol. 14. P. 4–8.
- Lu L., Pan J., Zhu D. 16 – quality requirements of iron ore for iron production / *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*. 2015. P. 475–504.
- Babich A., Senk D. 17 – recent developments in blast furnace iron-making technology / *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*. 2015. P. 505–547.
- Коротич В. И., Фролов Ю. А., Бездежский Г. Н. Агломерация рудных материалов : научное издание. — Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2003. — 400 с.
- Dmitriev A. N., Vitkina G. Yu., Chesnokov Yu. A., Petukhov R. V. Iron Ore Materials and Coke Quality Characteristics and Quantitative Indicators of Blast Furnace Smelting // *IFAC Proceedings*. 2013. Vol. 46, Iss. 16. P. 307–311.
- Малышева Т. Я., Долицкая О. А. Петрография и минералогия железорудного сырья : учеб. пособие для вузов. — М.: МИСиС, 2004. — 424 с.
- Lu L., Ishiyama O. 14 – iron ore sintering / *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*. 2015. P. 395–433.
- Gustafsson G., Häggblad H.-Å., Jonsén P., Marklund P. Determination of bulk properties and fracture data for iron ore pellets using instrumented confined compression experiments // *Powder Technology*. 2013. Vol. 241. P. 19–27.
- Mróz J. Non-isothermal reduction as a method of determining the softening — melting temperature of iron-ore pellets and sinters // *Steel Research*. 1998. Vol. 69, Iss. 12. P. 465–468.
- Sheng-li Wu, Xiao-qin Liu, Qi Zhou et al. Low Temperature Reduction Degradation Characteristics of Sinter, Pellet and Lump Ore // *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2011. Vol. 18, Iss. 8. P. 20–24.
- Ilijana M., Kemppainen A., Paananen T. et al. Effect of adding limestone on the metallurgical properties of iron ore pellets // *International Journal of Mineral Processing*. 2015. Vol. 141. P. 34–43.
- Dwarapudi S., Sekhar C., Paul I. et al. Effect of fluxing agents on reduction degradation behaviour of hematite pellets // *Ironmaking & Steelmaking*. 2015. Vol. 43, Iss. 3. P. 180–191.
- Павлов А. В., Онорин О. П., Спиринов Н. А., Полинов А. А. Работа доменных печей ОАО «ММК» с высокой долей окатышей в шихте. Часть 1 // *Металлург*. 2016. № 6. С. 36–42.
- Lingyun Yi, Zhucheng Huang, Tao Jiang et al. Iron ore pellet disintegration mechanism in simulated shaft furnace conditions // *Powder Technology*. 2017. Vol. 317. P. 89–94.
- Umadevi T., Kumar A., Karthik P. et al. Characterisation studies on swelling behaviour of iron ore pellets // *Ironmaking & Steelmaking*. 2018. Vol. 45. No. 2. P. 157–165.
- Yang J.-L., Tan S.-Q., Wang Z.-P. Increase pellet proportion to optimize burden composition of BF. Kang T'ieh // *Iron and Steel (Peking)*. 2005. Vol. 40, Iss. 10. P. 13–17.
- Субагатуллин С. К., Майорова Т. В. Увеличение работы газового потока в доменной печи с повышением общего перепада давления по высоте // *Вестник Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова*. 2011. № 1. С. 14–16.
- Овчинникова Е. В., Шаповалов А. Н. Влияние параметров дутьевого режима на эффективность доменной плавки в условиях ОАО «Уральская Сталь» // *Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: Metallurgy*. 2013. Т. 13. № 1. С. 61–67.
- Zhaoyang Li, Shibo Kuang, Sida Liu et al. Numerical investigation of burden distribution in ironmaking blast furnace // *Powder Technology*. 2019. Vol. 353. P. 385–397.
- Gao Q., Shen F., Wei G. et al. Effects of MgO Containing Additive on Low-Temperature Metallurgical Properties of Oxidized Pellet // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2013. Vol. 20, Iss. 7. P. 25–28.
- Shen F., Gao Q., Jiang X. et al. Effect of magnesia on the compressive strength of pellets // *Int. Journal Miner. Metall. Mater.* 2014. Vol. 21, Iss. 5. P. 431–437.
- Qing G. L., Wang C. D., Hou E. J. et al. Compressive strength and metallurgical property of low silicon magnesium pellet // *Journal of Iron and Steel Research*. 2014. Vol. 26, Iss. 4. P. 7–12.
- Pal J., Arunkumar C., Rajshekhar Y. Development on iron ore pelletization using calcined lime and MgO combined flux replacing limestone and bentonite // *ISIJ International*. 2014. Vol. 54, Iss. 10. P. 2169–2178.
- Овчинникова Е. В., Горбунов В. Б., Шаповалов А. Н. и др. Экспериментальные исследования магниезильных агломератов с использованием флюса на основе силиката магния // *Сталь*. 2018. № 1. С. 2–5.
- Шаповалов А. Н., Овчинникова Е. В., Горбунов В. Б. et al. The effect of the composition of magnesia flux on the sinter structure and properties // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 625. 012009.
- Шаповалов А. Н., Овчинникова Е. В., Горбунов В. Б. Использование магниезильных флюсов Халиловского месторождения при производстве агломерата // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 7. С. 548–556.
- Wang R., Zhang J., Liu Z. et al. Interaction between iron ore and magnesium additives during induration process of pellets // *Powder Technology*. 2020. Vol. 36. P. 894–902. ЧМ

DOI: 10.17580/chm.2021.01.01

“CHERNYE METALLY”, 2021, No. 1, pp. 4–10

INFLUENCE OF THE CONSUMPTION OF PELLETS WITH DIFFERENT BASICITY ON INDICATORS OF BLAST-FURNACE SMELTING

R. R. Dema¹, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Machines and Technologies for Metal Forming and Mechanical Engineering;
 A. N. Shapovalov², Cand. Eng., Associate Prof., Head of Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment;
 S. N. Baskov³, Associate Prof., Dept of Mechatronics and Automation

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University (Magnitogorsk, Russia)

² National University of Science and Technology “MISIS”, Novotroitsk branch (Novotroitsk, Russia)

³ South Ural State University (Chelyabinsk, Russia)

E-mail: demarr78@mail.ru, alshapo@isis.ru, sbaskov@mail.ru

Abstract: The results of the analysis of production data on the operation of blast furnace No. 1 (useful volume 1007 m³) of Ural Steel JSC for the period from 2013 to 2018 are presented. During this period, pellets from the Mikhailovsky GOK were used with varying degrees of fluxing: pellets of natural basicity in the ratio of CaO/SiO₂ equal to 0.08 ± 0.02 units. (2013-2015) and partially fluxed pellets with a basicity of 0.52 ± 0.05 units. (from 2016 to the present).

It has been established that the effectiveness of the use of pellets of various basicities is determined by their behavior in the blast furnace and depends on the proportion of pellets in the iron ore part of the charge. The gas-dynamic conditions of the smelting worsen with an increase in the proportion of pellets in the charge, which is accompanied by an increase in the specific pressure drop and forces the flow rate to be adjusted. There is an optimal level of specific pressure drop (53–55 Pa per 1 m³ of blast per minute) for the operating conditions of blast furnace No. 1 of Ural Steel, which ensures the optimum combination of the melting characteristics. Deviation from the optimal level of pressure drop leads to an increase in coke rate and a decrease in the degree of CO use, which is associated with gas distribution disturbance.

Due to the increase in high-temperature properties, the replacement of non-fluxed pellets with off-fluxed pellets improves the gas-dynamic conditions in the lower part of the mine (in the cohesive zone). This leads to a decrease in the total pressure drop and specific pressure drop at a constant flow rate of the blast, and is a reserve for melting intensification.

To minimize coke rate and maintain the high-performance operation of blast furnaces of Ural Steel JSC, it is necessary to work on 40–45 % of fluxed or 20–25 % acid pellets in a charge. An increase in pellet consumption while maintaining the efficiency of blast-furnace smelting is possible only if their high-temperature properties are improved. The improvement of these properties is possible as a result of optimizing the basicity and increasing the MgO content, which affects the structure and properties of the silicate bond.

Key words: blast-furnace smelting, ore pellets consumption, non-fluxed pellets, fluxed pellets, productivity, coke rate, pressure drop, blast rate.

This work is carried out within a framework of the government order (No. FZRU-2020-0011) of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

References:

1. Kurunov I. F. Blast furnace process is there an alternative? *Metallurg.* 2012. No. 4. pp. 40–44.
2. Iron metallurgy: textbook for universities 3rd edition revised and supplemented. Edited by Yusfin Yu. S. Moscow: IKTs "Akademkniga", 2004. 774 p.
3. Gao Q., Shen Y., Wei G., Jiang X., Shen F. Diffusion behavior and distribution regulation of MgO in MgO-bearing pellets. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials.* 2016. Vol. 23, Iss. 9. pp. 1011–1018.
4. Puzakov P. V., Kozub A. V., Ugarov A. A., Efendiev N. T., Lavrinenko A. A. et al. Technological parameters determining physical-chemical properties and required quality of green pellets at the roasting machine No. 3 of PJSC "Mikhailovsky GOK". *CIS Iron and Steel Review.* 2017. Vol. 14. pp. 4–8.
5. Lu L., Pan J., Zhu D. 16 – Quality requirements of iron ore for iron production. *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability.* 2015. pp. 475–504.
6. Babich A., Senk D. 17 – Recent developments in blast furnace iron-making technology. *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability.* 2015. pp. 505–547.
7. Korotich V. I., Frolov Yu. A., Bezdezhskiy G. N. Agglomeration of ore materials: Scientific edition. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2003. 400 p.
8. Dmitriev A. N., Vitkina G. Yu., Chesnokov Yu. A., Petukhov R. V. Iron Ore Materials and Coke Quality Characteristics and Quantitative Indicators of Blast Furnace Smelting. *IFAC Proceedings.* 2013. Vol. 46, Iss. 16. pp. 307–311.

9. Malysheva T. Ya., Dolitskaya O. A. Petrography and mineralogy of iron ore raw materials: textbook for universities. Moscow: MISiS, 2004. 424 p.
10. Lu L., Ishiyama O. 14 – Iron ore sintering. *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability.* 2015. pp. 395–433.
11. Gustafsson G., Häggblad H. -Å., Jonsén P., Marklund P. Determination of bulk properties and fracture data for iron ore pellets using instrumented confined compression experiments. *Powder Technology.* 2013. Vol. 241. pp. 19–27.
12. Mróz J. Non-isothermal reduction as a method of determining the softening — melting temperature of iron-ore pellets and sinters. *Steel Research.* 1998. Vol. 69, Iss. 12. pp. 465–468.
13. Sheng-li Wu, Xiao-qin Liu, Qi Zhou et al. Low Temperature Reduction Degradation Characteristics of Sinter, Pellet and Lump Ore. *Journal of Iron and Steel Research, International.* 2011. Vol. 18. Iss. 8. pp. 20–24.
14. Iljana M., Kempainen A., Paananen T. et al. Effect of adding limestone on the metallurgical properties of iron ore pellets. *International Journal of Mineral Processing.* 2015. Vol. 141. pp. 34–43.
15. Dwarapudi S., Sekhar C., Paul I. et al. Effect of fluxing agents on reduction degradation behaviour of hematite pellets. *Ironmaking & Steelmaking.* 2015. Vol. 43, Iss. 3. pp. 180–191.
16. Pavlov A. V., Onorin O. P., Spirin N. A., Polinov A. A. Operation of blast furnaces of OJSC MMK with a high proportion of pellets in the charge. Part 1. *Metallurg.* 2016. No. 6. pp. 36–42.
17. Lingyun Yi, Zhucheng Huang, Tao Jiang et al. Iron ore pellet disintegration mechanism in simulated shaft furnace conditions. *Powder Technology.* 2017. Vol. 317. pp. 89–94.
18. Umadevi T., Kumar A., Karthik P. et al. Characterisation studies on swelling behaviour of iron ore pellets. *Ironmaking & Steelmaking.* 2018. Vol. 45. No. 2. pp. 157–165.
19. Yang J.-L., Tan S.-Q., Wang Z.-P. Increase pellet proportion to optimize burden composition of BF. *Kang T'ieh / Iron and Steel (Peking).* 2005. Vol. 40, Iss. 10. pp. 13–17.
20. Sibagatullin S. K., Mayorova T. V. Increase in the gas flow activity in the BF with an increase in the total pressure drop along the height *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G. I. Nosova.* 2011. No. 1. pp. 14–16.
21. Ovchinnikova E. V., Shapovalov A. N. Influence of the blast mode parameters on the efficiency of blast-furnace smelting in the conditions of JSC Ural Steel. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya.* 2013. Vol. 13. No. 1. pp. 61–67.
22. Zhaoyang Li, Shibo Kuang, Sida Liu et al. Numerical investigation of burden distribution in ironmaking blast furnace. *Powder Technology.* 2019. Vol. 353. pp. 385–397.
23. Gao Q., Shen F., Wei G. et al. Effects of MgO Containing Additive on Low-Temperature Metallurgical Properties of Oxidized Pellet. *Journal of Iron and Steel Research International.* 2013. Vol. 20, Iss. 7. pp. 25–28.
24. Shen F., Gao Q., Jiang X. et al. Effect of magnesia on the compressive strength of pellets. *Int. Journal Miner. Metall. Mater.* 2014. Vol. 21, Iss. 5. pp. 431–437.
25. Qing G. L., Wang C. D., Hou E. J. et al. Compressive strength and metallurgical property of low silicon magnesium pellet. *Journal of Iron and Steel Research.* 2014. Vol. 26, Iss. 4. pp. 7–12.
26. Pal J., Arunkumar C., Rajshekhar Y. Development on iron ore pelletization using calcined lime and MgO combined flux replacing limestone and bentonite. *ISIJ International.* 2014. Vol. 54, Iss. 10. pp. 2169–2178.
27. Ovchinnikova E. V., Gorbunov V. B., Shapovalov A. N. et al. Experimental studies of magnesia agglomerates using a flux based on magnesium silicate. *Stal.* 2018. No. 1. pp. 2–5.
28. Shapovalov A. N., Ovchinnikova E. V., Gorbunov V. B. et al. The effect of the composition of magnesia flux on the sinter structure and properties. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2019. Vol. 625. 012009.
29. Shapovalov A. N., Ovchinnikova E. V., Gorbunov V. B. The use of magnesia fluxes of the Khalilovo deposit in the sinter production. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya Metallurgiya.* 2019. Vol. 62. No. 7. pp. 548–556.
30. Wang R., Zhang J., Liu Z. et al. Interaction between iron ore and magnesia additives during induration process of pellets. *Powder Technology.* 2020. Vol. 36. pp. 894–902.