

ISSN 0132-0890
www.rudmet.ru

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издается с 1961 года
(№ 1103)

11.2023

МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Тема номера:

**80 лет кафедре «Обработка материалов
давлением и аддитивные технологии»
Московского политехнического
университета (стр. 15-69)**

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 11 (1103), ноябрь 2023 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»
ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия»
имени С. П. Королева»
ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК»
ФГБУК «Государственный Эрмитаж»

Официальный информационный орган
Федерального УМО
«Технологии материалов»

Редакционный совет:

Главный редактор: В. М. Колокольцев
Первый зам. главного редактора: К. Л. Косырев
Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников, А. Г. Воробьев
А. М. Беленький, В. Блек (Германия), Ю. Л. Бобарикин (Беларусь), О. И. Борискин, И. В. Буторина,
Р. М. Валеев, Е. П. Волынкина, А. В. Выдрин, С. П. Галкин, Е. А. Голи-Оглу (Дания), Я. М. Гордон (Канада),
Д. Г. Еланский, Н. А. Зюбан, И. Е. Илларионов, Л. М. Капуткина, А. А. Казаков, А. П. Коликов,
С. В. Коновалов, А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарв, И. О. Леушин, И. П. Мазур, Т. Н. Матвеева, А. В. Мунтин,
А. Е. Пелевин, Ю. Ю. Пиотровский, И. М. Потравный, А. Н. Савенок (Беларусь), А. В. Серебряков,
Е. Ю. Сидорова, И. А. Султангузин, А. Я. Травянов, А. С. Харченко, Н. А. Чиченев, М. В. Чукин,
И. В. Чуманов, А. Н. Шаповалов, П. Шеллер (Германия), Е. А. Яценко

Редакция:

Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников
Ответственный секретарь: Е. Ю. Рахманова

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»
Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 622

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

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения
«Черные металлы» № 11 (1103), ноябрь 2023 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

Дата выхода в свет: 07.12.2023. Формат 60x90/8.
Печ. л. 12,75. Офсетная печать. Бумага офсетная.
Тираж 800 экз. Цена свободная

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

Подписной индекс:
12985 («Пресса России»)

ISSN 0132-0890



9 770132 089006 >

СОДЕРЖАНИЕ

Производство чугуна

- Е. А. Грибанов, Д. Р. Ганин, А. Ю. Фукс.* Повышение эффективности работы доменного производства АО «Уральская сталь» за счет уменьшения содержания фракции +80 мм в металлургическом коксе. 4

Производство стали

- Г. П. Вяткин, А. Н. Аникеев, Н. А. Шабурова, В. В. Седухин.* Идентификации интерметаллидной сигма-фазы в супердуплексных сталях методами металлографического анализа 8

80 лет кафедре «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета

- Д. А. Гневашев, Н. Ф. Шпунькин.* 80 лет кафедре «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета 15
- Р. Л. Шаталов.* Развитие теории расчета силовых показателей прокатки по длине тонких полос и лент 23
- С. А. Типалин, М. В. Боднар, В. Б. Белоусов.* Изменения толщины фланца при вытяжке листовых заготовок 29
- М. А. Петров, Е. В. Крутина.* Численное исследование процесса гибки труб малого диаметра из коррозионностойкой стали 34
- С. А. Типалин, Ю. Г. Калпин, Н. А. Куприянова.* Особенности расчета силовых параметров правки биметаллических листовых заготовок 42
- Д. А. Гневашев, Ш. Ф. Оруджев.* Исследование процесса гибки длинномерных листовых изделий с подбором прижимов на основе компьютерного моделирования 47
- Р. Л. Шаталов, Е. Е. Загоскин, В. А. Медведев.* Разработка и исследование условий температурной обработки, обеспечивающих заданные размеры и свойства стальных сосудов на прокатно-прессовой линии. 53
- Н. Ф. Шпунькин.* Технологические возможности испытательной машины МТЛ-10Г-1. 59
- Ю. К. Филиппов, Д. А. Гневашев, Ле Чунг Зунг.* Особенности построения кривой упрочнения при испытании образцов на одноосное сжатие в зависимости от величины деформации 66

Производство труб

- Б. В. Баричко, Я. И. Космацкий, Н. В. Фокин.* Улучшение качества высадки труб нефтяного сортамента. 70

Нагрев и термообработка

- В. Б. Деев, С. Л. Арапов, А. А. Косович, Е. М. Лесив.* Определение рациональных режимов термической обработки новой высокомарганцевой аустенитной стали с использованием термодинамического моделирования 75

Металловедение и физика металлов

- А. А. Казаков, Е. С. Мурсенков, В. А. Мурысев, Д. В. Киселев.* Диаграммы фазовых равновесий для интерпретации природы неметаллических включений в низкоуглеродистых сталях, модифицированных кальцием и церием 81
- Д. А. Болдырев, А. А. Николаев, М. В. Харченко, С. П. Нефедьев.* Влияние микролегирующих добавок карбидообразующих элементов и серы на комплекс свойств чугуновых заготовок тормозных дисков. 90

Нанесение покрытий и защита от коррозии

- Е. И. Пряхин, Д. А. Прибыткова.* Влияние качества подготовки поверхности труб для теплосетей на их коррозионную стойкость при эксплуатации в условиях подземного залегания 97

Хроника

- Александрю Евгеньевичу Семину — 75 лет III стр. обл.

Журнал "Черные металлы"

по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен в
"Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук"

Повышение эффективности работы доменного производства АО «Уральская Сталь» за счет уменьшения содержания фракции +80 мм в металлургическом коксе

Е. А. Грибанов, главный инженер коксохимического производства¹, эл. почта: e.gribanov@uralsteel.com

Д. Р. Ганин, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования², канд. техн. наук, эл. почта: dmrgan@mail.ru

А. Ю. Фукс, главный специалист по аглодоменному производству технической дирекции¹, эл. почта: auyf181073@mail.ru

¹АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия.

²Новотроицкий филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», Новотроицк, Россия.

В металлургическом коксе производства АО «Уральская Сталь», который является основной продукцией коксохимического производства предприятия, содержится значительное количество (до 46,6 %) крупной и непрочной фракции +80 мм. Уменьшение содержания фракции +80 мм в коксе на 1 % позволяет снизить удельный расход кокса в доменных печах на 0,2 % и увеличить их производительность на 0,2 %. Снижение содержания фракции +80 мм в коксе путем внесения изменений в технологию его производства является затратным и трудоемким. Решить данную задачу можно путем дробления фракции +80 мм кокса. Для уменьшения содержания фракции +80 мм в коксе предлагается между конвейерами К-1б и К-2б, а также конвейерами К-1а и К-2а установить шнекозубчатые дробилки. Достоинствами этих дробилок являются возможность изменения межосного расстояния, низкая степень переизмельчения дробимого продукта, максимальный выход продуктов заданного класса крупности, возможность получения большой степени сокращения дробимого куска за одну стадию дробления, возможность работы и запуска под завалом, возможность удаления недробимых тел из процесса, отсутствие вибраций и динамических нагрузок на конструкции, относительно небольшие габаритные размеры, простота монтажа. Затраты на приобретение, транспортировку и установку шнекозубчатых дробилок составят 130 млн руб. и окупятся менее чем за 2 мес.

Ключевые слова: доменная печь, качество кокса, гранулометрический состав кокса, дробление, шнекозубчатая дробилка, удельный расход кокса, производительность доменных печей.

DOI: 10.17580/chm.2023.11.01

Введение

Основной продукцией коксохимического производства (КХП) АО «Уральская Сталь» являются кокс металлургический для доменного цеха (ДЦ) предприятия (размер кусков +25 мм), коксовый орешек (10–25 мм) и коксовая мелочь (0–10 мм). Каменноугольный кокс сухого и мокрого тушения, используемый на предприятии, производится из низкосернистых углей (0,3–1,0 %) Кузнецкого, Печорского и Южно-Якутского бассейнов [1–3]. От качества кокса (основной статьи затрат в себестоимости чугуна) и железорудных материалов зависит ровный ход доменной плавки и производительность доменной печи (ДП) [4]. Качество кокса оценивается химическим составом и физическими показателями (прочность, истираемость, гранулометрический состав), зависящими от качества исходного сырья (химической структуры угля [5–8] и его гранулометрического состава, так как коксующесть материала разных фракций отличается [9]) и условий его переработки (периода коксования, уровня температур в контрольных вертикалах, равномерности прогрева коксующей загрузки по всему объему, конечной температуры коксового пирога, режимов тушения

и коксортировки) [10, 11]. Кокс обеспечивает газопроницаемость столба шихты в ДП, поэтому к нему предъявляют жесткие требования по гранулометрическому составу и прочности [12]. Прочный пористый кокс улучшает газопроницаемость доменной шихты, а непрочный создает угрозу замусоривания горна коксовой пылью, ухудшает сход шихты в ДП, снижая ее газопроницаемость [13].

Кокс должен иметь однородную крупность, содержать минимальное количество самой крупной и непрочной фракции +80 мм, которую в первую очередь нужно подвергать механической обработке для реализации трещин и слабых мест и затем отделять мелкие фракции. Значительное количество (до 46,6 %) фракции +80 мм содержится в металлургическом коксе, производимом в КХП АО «Уральская Сталь». Согласно исследованиям И. Г. Товаровского и других ученых, снижение содержания фракции +80 мм в коксе на 1 % уменьшает удельный расход кокса на 0,2 % и увеличивает производительность ДП на 0,2 % [14].

Снижение содержания фракции +80 мм в металлургическом коксе производства КХП возможно путем внесения изменений в технологию его производства, однако эти меро-

приятия являются трудоемкими и затратными. Авторами предложено механическое дробление фракции +80 мм в коксе.

Целью данной работы является анализ и выбор дробильного оборудования для уменьшения содержания фракции +80 мм в металлургическом коксе предприятия.

Материалы и методика исследования

Нормы качества металлургического кокса для ДЦ АО «Уральская Сталь» определяются требованиями СТП 13657842-27 (таблица). Требования к содержанию фракции +80 мм в металлургическом коксе, производимом на предприятии, отсутствуют.

Анализ технологии производства и транспортировки кокса в ДЦ показал, что кокс после мокрого тушения через коксовые рампы № 1–3 и после сухого тушения через разгрузочные рампы каждой камеры поступает на коксортировку для классификации по крупности, осуществляемой

на валковых и вибрационных грохотах (разделение кокса с первоначальным отделением крупных классов).

После коксовых рамп № 1, 2 (батареи № 1, 3, 4) и № 3 (батареи № 5, 6) кокс подается конвейерами первой (К-1а, К-2а, К-16 и К-26) и второй (К-16а и К-16б) коксортировки на валковые грохоты Grizzly (Гризли), где происходит первоначальный рассев кокса на класс +25 мм, который конвейерами К-8, К-19 подается в бункеры крупного кокса для погрузки в железнодорожные вагоны. Подрешетный продукт валковых грохотов по конвейерам К-5а, К-5б, К-18 поступает на контрольные вибрационные грохоты (ВГО), где происходит отсев кокса +25 мм, который добавляется к надрешетному продукту грохотов Grizzly или подается в ДЦ ленточными конвейерами К-6а, К-6б, К-8, К-3а, К-3б, К-4а, К-4б. На участке коксортировки № 2 отсев кокса +25 мм подается транспортерами К-22а, К-24, К-25, К-26 в ДЦ. Подрешетный продукт после контрольных ВГО конвейерами К-7, К-22 транспортируется в помещение бункеров мелких фрак-

Нормы качества металлургического кокса для доменного цеха

Показатель	Норма	
	Средняя	Не более
Массовая доля рабочей влаги W_f^r , %	–	5,5
Зольность A^d , %	12,8	13,6
Массовая доля общей серы S^d , %	0,7	0,8
Выход летучих веществ V^{daf} , %	–	1,2
Прочность кокса, %: M_{25} M_{10}	–	Не менее 84,0
	9,0	11,0
Доля кусков размером менее 25 мм, % (мас.)	3,0	4,5

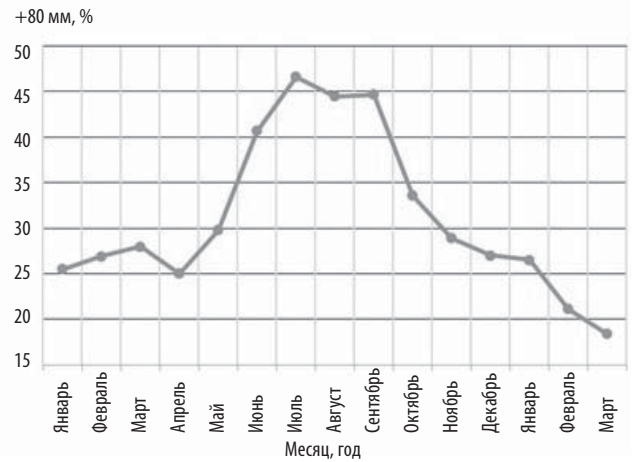


Рис. 1. Усредненные значения содержания фракции +80 мм в металлургическом коксе

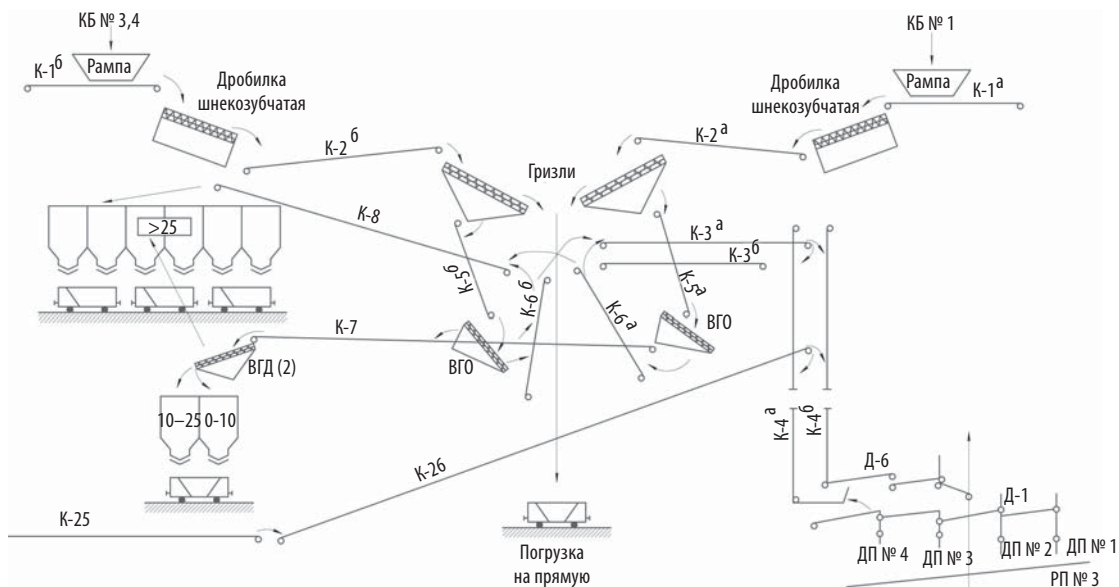


Рис. 2. Технологическая схема участка коксортировки № 1 с местами установки шнекозубчатых дробилок

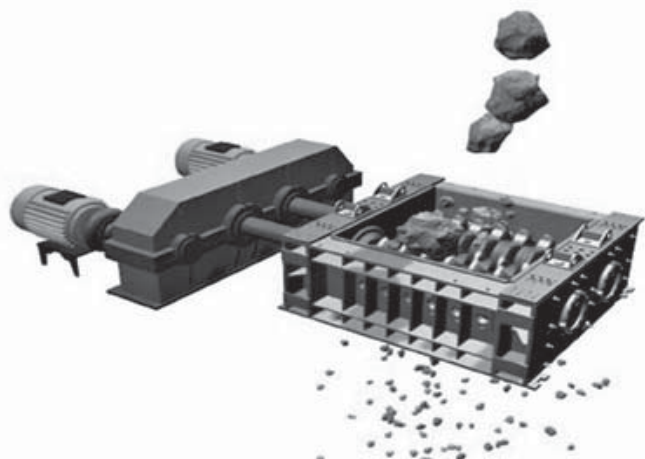


Рис. 3. Шнекозубчатая дробилка

ций кокса. Рассев кокса на фракции размером 25–10 и 10–0 мм осуществляется на двухситовых вибрационных грохотах. После отсева на грохотах кокс поступает в бункеры, из которых грузится в железнодорожные вагоны.

На рис. 1 приведены усредненные данные содержания фракции +80 мм в металлургическом коксе, из которых следует, что среднее содержание данной фракции составляет 31,1 %.

Несколько лет назад с целью сокращения содержания фракции +80 мм в металлургическом коксе в перегрузочном узле между конвейерами К-1б и К-2б установлено дробильное устройство, разработанное проектно-конструкторским центром (ПКЦ) АО «Уральская Сталь», которое не обеспечивает необходимое качество кокса по гранулометрическому составу и является ненадежным в работе. В связи с этим принято решение рассмотреть возможность установки дробилки заводского производства между конвейерами К-1б и К-2б и между конвейерами К-1а и К-2а (рис. 2).

Для дробления кокса широко применяют валковые дробилки, среди которых выделяют дробилки с зубчатыми валками, достоинством которых является отсутствие переизмельчения материала [15]. Для исследования выбрана шнекозубчатая дробилка (рис. 3).

Преимуществами таких дробилок являются: возможность изменения межосевого расстояния (разведение и сведение валов дробилки гидравлическими домкратами, фиксация межосевого расстояния механическая); низкая степень переизмельчения дробимого продукта; максимальный выход продуктов заданного класса крупности; возможность получения большой степени сокращения дробимого куска за одну стадию дробления; возможность работы и запуска под завалом; удаление недробимых тел из процесса, что предотвращает засорение дробленого угля недробимыми включениями; отсутствие вибраций и динамических нагрузок на конструкции; относительно небольшие габаритные размеры; простота монтажа.

Требования к техническим характеристикам шнекозубчатой дробилки приведены ниже.

Требования к техническим характеристикам шнекозубчатой дробилки

Дробимый материал	Кокс металлургический
Температура материала, °С	150–250
Температура окружающего воздуха, °С	От –30 до +40
Насыпная плотность, т/м ³	0,5
Влажность, %	До 10
Производительность рабочая, т/ч	До 250
Рабочая крупность куска на входе, мм	До 200
Число валов	2
Габаритные размеры дробилки, мм	Не более 2400×3500×1200

Автоматизированная система управления электроприводом дробилки призвана обеспечивать отработку алгоритма управления приводом при попадании недробимых тел. Сигнал на отработку алгоритма должен поступать от датчика скорости вращения дробящего вала. После поступления сигнала аварийного останова должно производиться заданное число попыток реверса дробилки с последующим запуском в прямом направлении. Если во время попыток удастся раздробить материал, то дробилка выводится на рабочий режим. Если за заданное число попыток запуск дробилки не осуществлен, то должен подаваться сигнал аварийного останова или сигнал на удаление тела из дробящей камеры. После поступления сигнала на удаление недробимого тела оба вала начинают вращаться в сторону разгрузочного окна. Система программирования контроллера должна позволять задавать число попыток пуска, длительность работы в реверсе и рабочем направлении, алгоритм отработки аварийного режима, подачу сигнала «останов», время включения и отработку режима удаления недробимого тела.


Себестоимость 1 т кокса составляет 17 086,38 руб., себестоимость 1 т чугуна — 21 319,84 руб. При этом годовая экономия кокса и увеличение производство чугуна при снижении содержания фракции кокса +80 мм на 31,1 % составят $31,1 \times 0,2 = 6,22$ % (56 534,31 т кокса (965,97 млн руб.) и 128 853,15 т чугуна (198,56 млн руб.)).

Затраты на приобретение, транспортировку, установку (разработка проектно-конструкторской документации, демонтаж дробильного устройства разработки ПКЦ, установка двух дробилок), обучение персонала составят 130 млн руб. и окупятся менее чем за 2 мес. Результаты уменьшения содержания фракции +80 мм в металлургическом коксе будут опубликованы после установки дробилок.

Выводы

В металлургическом коксе, производимом в КХП АО «Уральская Сталь», содержится значительное количество (до 46,6 %) фракции +80 мм. Уменьшение содержания данной фракции на 1 % путем ее дробления снижает удельный расход кокса на 0,2 % и увеличивает производительность ДП на 0,2 %.

С этой целью между конвейерами К-1б и К-2б, К-1а и К-2а установлены шнекозубчатые дробилки. Затраты на приобретение, транспортировку и установку двух шнекозубчатых

дробилок составят 130 млн руб. и окупятся менее чем за 2 мес. 

В работе принимали участие студенты М. А. Вишневецкий, Е. Б. Досов, А. А. Култасова, В. А. Проконова, В. С. Шевицов, А. Ю. Шерстобитова.

Библиографический список

1. Ганин Д. Р., Дружков В. Г., Панычев А. А., Фукс А. Ю. Анализ показателей и условий улучшения работы доменного цеха АО «Уральская Сталь» // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 12. С. 46–54. DOI: 10.32339/0135-2018-12-46-54.
2. Ганин Д. Р., Фукс А. Ю. Взаимосвязь газодутьевых параметров доменных печей и основных качественных показателей кокса в условиях АО «Уральская Сталь» // Черные металлы. 2023. № 1. С. 4–7.
3. Ганин Д. Р., Фукс А. Ю. Анализ влияния качества кокса на производство чугуна в условиях АО «Уральская Сталь» // Черные металлы. 2021. № 2. С. 4–9.
4. Гилева Л. Ю., Каплун Л. И., Загайнов С. А. Металлургия чугуна. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2021. — 128 с.
5. Лялюк В. П. Технология подготовки шихты при производстве качественного кокса для доменной плавки. — Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. — 212 с.
6. Лялюк В. П., Мучник Д. А., Кассим Д. А., Шмельцер Е. О. Качество кокса и перспективы доменной плавки. — Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. — 229 с.

7. Guo J., Shen Y., Wang M., Kong J. et al. Impact of chemical structure of coal on coke quality produced by coals in the similar category // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2022. Vol. 162. 105432.
8. Zhang W., Shi T., Zhang Q., Cao Y. et al. Coke texture, reactivity and tumbler strength after reaction under simulated blast furnace conditions // Fuel. 2019. Vol. 251. P. 218–223.
9. Ghosh B., Sahoo B. K., Chakraborty B., Manjhi Das S. K. et al. Influence of coke structure on coke quality using image analysis method // International Journal of Coal Science & Technology. 2018. Vol. 5. P. 473–485. DOI: 10.1080/197392699.2017.1340883.
10. Liu L., Yang S., Liu S., Du W. et al. Prediction of coke quality based on improved WOA-LSTM // Journal of Chemical Industry and Engineering. 2022. Vol. 73, Iss. 3. P. 1291–1299.
11. Kardas E., Pustějovska P. Quality of coke used in blast furnace process – Analysis of selected parameters // QPI. 2019. Vol. 1, Iss. 1. P. 602–609.
12. Gu K., Wu Sh., Kou M., Zhou H. et al. Influence of coke quality on main technical indexes of blast furnace // TMS 2018: 9th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. The Minerals, Metals & Materials Series. 2018. P. 745–752. DOI: 10.1007/978-3-319-72138-5_71.
13. Мучник Д. А., Бабанин В. И. Возможности улучшения качества кокса вне печной камеры. — М.: Инфра-Инженерия, 2014. — 368 с.
14. Товаровский И. Г., Меркулов А. Е. Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность // Металлургия чугуна – вызовы XXI века: труды VIII Международного конгресса доменщиков. — М.: Издательский дом «Кодекс», 2017. С. 111–122.
15. Вайсберг Л. А., Кононов О. В., Устинов И. Д. Основы геометаллургии. — СПб.: Русская коллекция, 2020. — 376 с.

“Chernye metally”, 2023, No. 11, pp. 4–7
DOI: 10.17580/chm.2023.11.01

Increasing the efficiency of the blast furnace production of Ural Steel by reducing the content of the +80 mm fraction in metallurgical coke

Information about authors

E. A. Gribanov, Chief Engineer of Coke Production¹, e-mail: e.gribanov@uralsteel.com;
D. R. Ganin, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment², e-mail: dmrngan@mail.ru;

A. Yu. Fuks, Chief Specialist in Sinter and Blast Furnace Production of the Technical Directorate¹, e-mail: ayf181073@mail.ru

¹Ural Steel, Novotroitsk, Russia.

²Novotroitsk branch of the National University of Science and Technology MISiS, Novotroitsk, Russia.

Abstract: The metallurgical coke produced by JSC "Ural Steel", which is the main product of the coke production of the enterprise, contains a significant amount (up to 46.6%) of a large and fragile fraction +80 mm. Reducing the content of the +80 mm fraction in coke by 1.0% makes it possible to reduce the specific consumption of coke in blast furnaces by 0.2% and increase their productivity by 0.2%. It is possible to reduce the content of the +80 mm fraction in coke by making changes to its production technology, but these measures are costly and laborious. It is easier to solve this problem by using mechanical regrinding of the fraction +80 mm of coke. To reduce the content of the +80 mm fraction in coke, it is proposed to install screw-toothed crushers between conveyors K-1b and K-2b, as well as between conveyors K-1a and K-2a. The advantages of these crushers are the possibility of changing the center distance; low degree of regrinding of crushed product; maximum yield of products of a given size class; the possibility of obtaining a large degree of reduction of the crushed piece in one stage of crushing; the ability to work and run under the rubble; the possibility of removing non-crushable bodies from the process; absence of vibrations and dynamic loads on structures; relatively small overall dimensions; ease of installation. The cost of purchasing, transporting and installing auger-toothed crushers will amount to 130 million rubles and will pay off in less than two months.

Key words: blast furnace, coke quality, coke granulometric composition, regrinding, screw-toothed crusher, coke specific consumption, blast furnace productivity.

Students M. A. Vishnevsky, E. B. Dosov, A. A. Kultasova, V. A. Prokopova, V. S. Shevtsov, A. Yu. Sherstobitova took part in the work.

References

1. Ganin D. R., Druzhkov V. G., Panychev A. A., Fuks A. Yu. Analysis of indicators and conditions for improving the work of the Ural Steel's blast furnace shop. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii*. 2018. No. 2. pp. 46–54. DOI: 10.32339/0135-2018-12-46-54.
2. Ganin D. R., Fuks A. Yu. Interrelation of gas-blown parameters of blast furnaces and the main quality indicators of coke in the conditions of JSC "Ural Steel". *Chernye Metally*. 2023. No. 1. pp. 4–7.
3. Ganin D. R., Fuks A. Yu. Analysis of the influence of coke quality on the production of pig iron in the conditions of JSC "Ural Steel". *Chernye Metally*. 2021. No. 2. pp. 4–9.
4. Gileva L. Yu., Kaplun L. I., Zagaynov S. A. Metallurgy of pig iron. Ekaterinburg : Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2021. 128 p.
5. Lyalyuk V. P. Technology of charge preparation in the production of high-quality coke for blast furnace smelting. Moscow; Vologda : Infra-Inzheneriya, 2020. 212 p.
6. Lyaluk V. P., Muchnik D. A., Kassim D. A., Shmel'tser E. O. Quality of coke and prospects for blast furnace smelting. Moscow; Vologda : Infra-Inzheneriya, 2020. 229 p.
7. Guo J., Shen Y., Wang M., Kong J. et al. Impact of chemical structure of coal on coke quality produced by coals in the similar category. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2022. Vol. 162. 105432.
8. Zhang W., Shi T., Zhang Q., Cao Y. et al. Coke texture, reactivity and tumbler strength after reaction under simulated blast furnace conditions. *Fuel*. 2019. Vol. 251. pp. 218–223.
9. Ghosh B., Sahoo B. K., Chakraborty B., Manjhi Das S. K. et al. Influence of coke structure on coke quality using image analysis method. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2018. Vol. 5. pp. 473–485. DOI: 10.1080/197392699.2017.1340883.
10. Liu L., Yang S., Liu S., Du W. et al. Prediction of coke quality based on improved WOA-LSTM. *Journal of Chemical Industry and Engineering*. 2022. Vol. 73, Iss. 3. pp. 1291–1299.
11. Kardas E., Pustějovska P. Quality of coke used in blast furnace process - Analysis of selected parameters. *QPI*. 2019. Vol. 1, Iss. 1. pp. 602–609.
12. Gu K., Wu Sh., Kou M., Zhou H. et al. Influence of coke quality on main technical indexes of blast furnace. *TMS 2018: 9th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. The Minerals, Metals & Materials Series*. 2018. pp. 745–752. DOI: 10.1007/978-3-319-72138-5_71.
13. Muchnik D. A., Babanin V. I. Possibilities for improving the quality beyond the coke furnace chamber. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2014. 368 p.
14. Tovarovsky I. G., Merkulov A. E. Standard assessment of the influence of blast furnace smelting parameters on coke consumption and productivity. *Metallurgy of pig iron - challenges of the 21st century: Proceedings of the VIII International Congress of Blast Furnace Engineers*. Moscow : Izdatelskiy dom "Kodeks", 2017. pp. 111–122.
15. Vaisberg L. A., Kononov O. V., Ustinov I. D. Fundamentals of geometallurgy. Saint-Petersburg : Russkaya kolleksiya, 2020. 376 p.