

ISSN 0132 – 0890
www.rudmet.ru

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издается с 1961 года
(№ 1111)

07.2024

*С Днем
металлурга!*

Тема номера:
5 лет ООО «ПромСорт-Тула»





Уважаемые коллеги, читатели журнала «Черные металлы»!

ООО «ПромСорт-Тула» является самым современным металлургическим предприятием России. Завод спроектирован с учетом новейших технологических разработок. Передовое оборудование в сталеплавильном комплексе позволяет производить марочный сортамент как рядового, так и высокого качества, а прокатный комплекс оснащен двумя взаимозаменяемыми станами, на которых выпускают арматуру, катанку, конструкционный и фасонный прокат.

В апреле 2024 г. предприятие отпраздновало 5-летний юбилей. За это время выплавлено более 7 млн т жидкой стали и произведено почти 6 млн т проката. В короткие сроки был освоен проектный сортамент по пруткам в мотках и сортовому прокату. Продукция завода используется в строительстве, машиностроении, метизном производстве и других отраслях отечественной промышленности.

Приоритет работы — экологичность производства. Завод оснащен самым современным газоочистным оборудованием, впервые в практике отечественной металлургии в конвертерном цехе, кроме рукавных фильтров, установлен электрофильтр, действует замкнутый водооборотный цикл.

Основополагающая роль в успехе предприятия принадлежит его коллективу. В ООО «ПромСорт-Тула» работают 2 тыс. сотрудников, многие из них трудятся с момента строительства завода. Несмотря на небольшой возраст, на предприятии уже появились первые династии металлургов, это очень важный индикатор, поскольку люди — основа развития компании.

ООО «ПромСорт-Тула» является ярким примером того, каким может быть современное металлургическое производство. Высокий уровень автоматизации, производственная дисциплина, высочайшее качество продукции — отличительные черты нашего предприятия.

Поздравляю с Днём металлурга! От всей души желаю процветания, профессионального роста и претворения в жизнь самых амбициозных планов!

Генеральный директор ООО «ПромСорт»

Е. А. Лещев

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 7 (1111), июль 2024 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. Кушнарев, 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

Журнал «Черные металлы» по решению ВАК Министерства науки и высшего образования РФ включен в
«Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим научным специальностям:
2.5.6. Технология машиностроения; 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением; 2.6.1. Металловедение и термическая
обработка металлов и сплавов; 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов; 2.6.3. Литейное производство;
2.6.4. Обработка металлов давлением; 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы;
2.6.17. Материаловедение; 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых.

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: chemet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru

www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения
«Черные металлы» № 7 (1111), июль 2024 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: 06.08.2024. Формат 60×90/8.
Печ. л. 11. 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

Подписные индексы:
12985 («Пресса России»)



СОДЕРЖАНИЕ

Обогащение руд

- А. Е. Пелевин.* Возможность использования мокрой магнитной сепарации для предварительного обогащения мелкодробленной магнетитовой руды 4

Подготовка сырьевых материалов

- А. Б. Лебедев, Э. Л. Ноа, Х. Я. Мартинес, Д. А. Баландинский.* Влияние смеси нефелина, красного шлама и обожженного кокса на прочность железорудных окатышей 10

Восстановление железа

- К. И. Смирнов, П. А. Гамов, В. С. Самолин, В. Е. Рощин.* Селективное восстановление железа из ильменитового концентрата 19

Агломерация

- Е. В. Женин, А. Н. Шаповалов.* Влияние температуры воды на результаты окомкования, показатели агломерационного процесса и качество агломерата 24

5 лет ООО «ПромСорт-Тула»

- С. С. Бондарев, М. А. Жигарев.* 5 лет тульской стали: краткие итоги развития 30

Производство чугуна

- В. А. Иванова, А. Г. Панов.* Анализ методов определения твердости чугуна на основе оценки точности измерений 34

- П. И. Черноусов, О. В. Голубев, С. В. Мясоедов, А. Н. Узунова.* Исследование влияния влажности дутья на показатели восстановительных процессов доменной плавки 38

- П. И. Черноусов, О. В. Голубев, Л. И. Лопачевская, М. В. Слонов.* Исследование поведения микропримесных элементов в доменной плавке 45

Прокатка и другие процессы ОМД

- К. С. Горбунов, Л. В. Носов, И. П. Мазур.* Исследование влияния асимметрии на энергосиловые параметры при холодной прокатке 52

Металловедение и термообработка

- И. С. Белашова, Л. Г. Петрова, Е. А. Маринин, П. С. Бибииков.* Влияние режимов циклического азотирования в аммиачно-воздушных атмосферах на фазовый состав диффузионного слоя мартенситной стали 56

- М. С. Аносов, М. А. Чернигин, Ю. С. Мордовина, Е. С. Аносова.* Структура и свойства сталей 08ХМФА и 30ХГСА, полученных методом электродуговой наплавки 63

Сварка и наплавка

- Р. Е. Крюков, А. Р. Михно, И. А. Панченко, С. В. Коновалов.* Исследование структуры и свойств сплава, полученного методом дуговой наплавки высокоэнтропийной порошковой проволокой системы Al – Co – Cr – Fe – Mn 70

- Э. С. Набиев, А. А. Фатхуллин, Ш. М. Худойбердиев.* Предварительное исследование возможности применения многоэлектродной электрошлаковой наплавки для изготовления биметаллических бил дробилок 77

Машиностроительные технологии

- С. А. Типалин, Б. Ю. Сапрыкин, Н. Д. Борисов.* Изгиб стального многослойного листового материала 83

Хроника

- К 90-летию Юлиана Семеновича Юсфина III стр. обл.

Влияние температуры воды на результаты окомкования, показатели агломерационного процесса и качество агломерата

Е. В. Женин, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования¹, канд. техн. наук,
эл. почта: zhenin.ev@misis.ru

А. Н. Шаповалов, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования¹, канд. техн. наук,
эл. почта: alshapo@misis.ru

¹Новотроицкий филиал Университета науки и технологий МИСИС, Новотроицк, Россия.

Представлены результаты исследования влияния температуры подаваемой при окомковании воды (в диапазоне от 20 до 80 °С) на качество подготовки агломерационной шихты, показатели процесса и прочность получаемого агломерата.

Установлено, что повышение температуры воды улучшает качество ее окомкования, что в первую очередь проявляется в упрочнении гранул. Полученные результаты объясняются изменением физических свойств воды по мере ее нагрева, а именно: снижением поверхностного натяжения и вязкости.

Показано, что подогрев воды, используемой при окомковании, является источником дополнительного нагрева агломерационной шихты, обеспечивая повышение ее температуры на 1,3–1,4 °С на каждые 10 °С увеличения температуры воды.

Установлено, что показатели агломерационного процесса и качество агломерата повышаются по мере увеличения температуры воды (в исследуемом диапазоне), используемой при окомковании, что во многом обусловлено улучшением качества подготовки агломерационной шихты к спеканию, и проявляется через улучшение газопроницаемости слоя спекаемой шихты и температурно-временных условий спекания.

Ключевые слова: агломерация, окомкование, температура воды, поверхностное натяжение, вязкость, газопроницаемость спекаемого слоя, показатели окомкования, показатели спекания, прочность на удар.

DOI: 10.17580/chm.2024.07.04

Введение

Окомкование является обязательной операцией подготовки агломерационной шихты к спеканию, во многом определяющей показатели агломерационного процесса и качество агломерата [1–3], особенно при работе с высокой долей тонкоизмельченных концентратов.

Для улучшения окомкования агломерационной шихты с высокой долей тонкозернистых материалов разработано большое число способов, среди которых, кроме традиционных (использование кусковых руд, корректировка влажности и режима окомкования) [1–3], можно выделить различные варианты повышения поверхностной активности железорудных компонентов шихты [4–6], применение различных поверхностно-активных веществ и связующих [7–10], введение извести [10–14], предварительную грануляцию тонкодисперсных материалов [15–18] и др.

В плане эффективности воздействия, распределение компонентов шихты по размерам и влага, доступная для грануляции (свободная влага), являются основными факторами, влияющими на процесс окомкования. При этом в конкретных шихтовых и технологических условиях работы агломерационного производства определяющее влияние на результаты окомкования оказывают режим увлажнения и физические свойства воды (вязкость, поверхностное натяжение и др.), влияющие на ее поведение при окомковании, толщину и прочность водных пленок в гранулах агломерационной шихты. Воздействие на физические свойства воды путем ее магнитной обработки и введения поверхностно-активных

добавок хорошо изучено [1–3, 7–10], однако о предварительном подогреве воды, подаваемой в окомкователь для увлажнения шихты, в научной литературе информации недостаточно. При этом известно, что повышение температуры воды в диапазоне от 0 до 100 °С приводит к уменьшению вязкости почти в 6 раз при одновременном снижении поверхностного натяжения почти в 1,5 раза [1, 19].

Целью данной работы является изучение влияния нагрева воды, используемой при окомковании, на результаты подготовки шихты к спеканию, показатели агломерации и качество агломерата.

Материалы и методика исследования

В соответствии с поставленной целью спланирован и реализован комплекс лабораторных экспериментов по изучению влияния температуры воды, используемой при подготовке шихты к спеканию, на результаты окомкования, показатели аглопроцесса и качество агломерата. Программа исследования предусматривала проведение четырех серий опытов с различной температурой воды, используемой при окомковании: от 20 °С (стандартная технология) до 80 °С с шагом 20 °С.

Исследования проводили для шихтовых условий работы агломерационного производства АО «Уральская Сталь» по состоянию на 2022 г., что исключало влияние состава шихты на результаты окомкования и спекания. Состав опытной шихты рассчитывали для получения агломерата основностью по $(CaO)/(SiO_2) = 1,6$ ед. с содержанием 1,6 % MgO при постоянном соотношении тонкозернистых концентратов и руд. Расход

твердого топлива подбирали экспериментально из условия получения в агломерате 10–13 % FeO и поддерживали постоянным (4,2 % горючего углерода) для всех экспериментов.

При подготовке агломерационной шихты выполняли додраблывание крупных фракций железорудных материалов (более 10 мм), что снижало влияние нестабильности гранулометрического состава компонентов на результаты окомкования и спекания.

Смешивание, увлажнение и окомкование агломерационной шихты проводили в барабанном окомкователе диаметром 0,6 м и длиной 1,2 м при скорости вращения 9 об/мин в идентичных условиях:

- смешивание без увлажнения в течение 2 мин;
- окомкование с подачей воды различной температуры (от 20 до 80 °С) до оптимальной влажности (7,0–7,5 %), характерной для шихтовых условий работы АО «Уральская Сталь» [8, 20], в течение 2 мин;
- окомкование без увлажнения в течение 1 мин.

Для оценки результатов окомкования проводили отбор проб агломерационной шихты с последующим определением влажности, температуры и гранулометрического состава шихты, а также прочности гранул крупностью 5–7 мм. При оценке результатов окомкования исходили из того, что качество подготовки аглошихты улучшается с ростом прочности гранул и увеличением содержания агломератов крупностью 3–6 мм при минимальной доле неокомкованной мелочи (менее 1 мм) и крупных фракций (более 10 мм) [1–3].

Спекания проводили на лабораторной установке с диаметром чаши 210 мм (рис. 1) при поддержании постоянной высоты слоя на уровне 350 мм, что характерно для условий работы агломерационного цеха АО «Уральская Сталь». В процессе спекания фиксировали основные параметры аглопроцесса и проводили замеры температуры в середине слоя спекаемой шихты.

После завершения агломерационного процесса и охлаждения спека до 100 °С полученный агломерат выгружали из аглолаги и определяли массу спека. Аггоспек подвергали троекратному сбрасыванию (по ГОСТ 25471–82 [21])

с последующим определением гранулометрического состава и выхода годного. Годный агломерат подвергали механическим испытаниям: определение прочности на удар и истирание во вращающемся барабане в соответствии с ГОСТ 15137–77 [22]. В каждой серии экспериментов проводилось не менее трех спеканий с целью достижения воспроизводимости результатов.

Результаты исследования и их обсуждение

Окомкование. Оценку результатов окомкования проводили по гранулометрическому составу окомкованной шихты, степени окомкования мелочи (0–1 мм), среднему эквивалентному диаметру и прочности гранул в сыром состоянии и после нагрева до 300 °С. Усредненные результаты подготовки агломерационной шихты к спеканию представлены в табл. 1.

Результаты подготовки агломерационной шихты к спеканию, представленные в табл. 1, показывают, что применение предварительно нагретой воды улучшает гранулометрический состав шихты, обеспечивая снижение доли неокомкованной мелочи (0–1 мм) при повышении количества хорошо окомкованной шихты (+3 мм). При этом степень влияния подогрева воды по мере роста ее температуры замедляется, что видно по доле хорошо окомкованной шихты, а также эквивалентному диаметру гранул, величина которого в температурном диапазоне 60–80 °С не изменяется.

Однако хороший гранулометрический состав шихты не предопределяет высоких показателей спекания, так как не гарантирует сохранение высокой газопроницаемости слоя спекаемой шихты под воздействием динамического и статического давления газового потока и собственной массы шихты (особенно при спекании «холодной» шихты и формирования зоны переувлажнения). Поэтому одним из важнейших условий высокой производительности агломерационных установок является получение гранул с высокой прочностью.

Анализ данных, полученных в ходе исследования (см. табл. 1), показал, что повышение температуры воды, подаваемой в шихту при окомковании, способствует упрочнению гранул как в сыром состоянии, так и после их термической обработки.

Учитывая, что эксперименты проводили в идентичных условиях, единственной причиной упрочнения гранул окомкованной шихты при повышении температуры воды является изменение ее физических свойств (поверхностного натяжения и вязкости). Снижение поверхностного натяжения воды облегчает ее диспергирование в агломерационной шихте, что в совокупности с уменьшением вязкости воды способствует более равномерному ее распределению по объему шихты (при постоянной влажности) с формированием большего числа водных менисков между частицами, что ускоряет процесс окомкования и способствует упрочнению гранул за счет развития капиллярных сил. Кроме того, пониженное поверхностное натяжение воды в процессе окомкования приводит к формированию более тонких адсорбированных водных пленок между частицами в грануле, что обуславливает

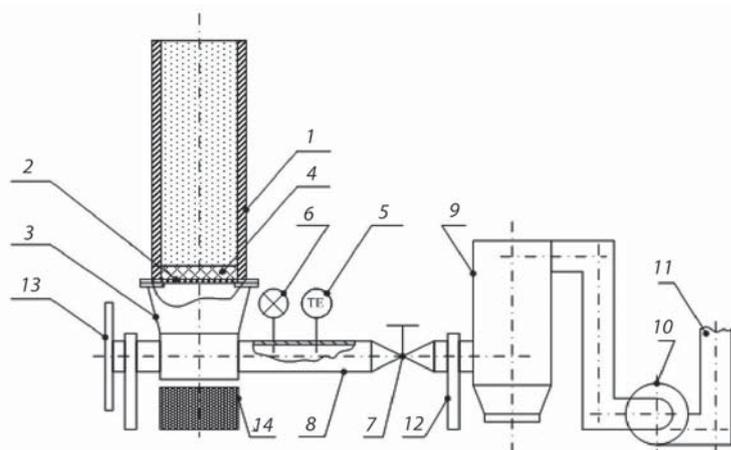


Рис. 1. Схема агломерационной установки:

- 1 — спекательная чаша; 2 — колосниковая решетка; 3 — вакуум-камера;
- 4 — постель; 5 — манометр; 6 — термопара; 7 — вентиль; 8 — коллектор;
- 9 — пылеуловитель; 10 — эксгаустр с фильтром; 11 — дымовая труба;
- 12 — опорная система; 13 — поворотное колесо; 14 — противовес

Таблица 1

Усредненные результаты подготовки агломерационной шихты к спеканию

Показатель		Значения при различных температурах воды (°C), подаваемой при окомковании			
		20	40	60	80
Влажность окомкованной шихты, %		7,25	7,20	7,20	7,15
Температура окомкованной шихты, °C		19,4	22,2	24,8	27,2
Фракционный состав окомкованной шихты, %	+10 мм	5,10	4,87	5,10	5,09
	5–10 мм	20,94	22,48	25,49	25,09
	3–5 мм	30,15	32,10	31,31	32,23
	1–3 мм	36,85	33,85	31,76	31,55
	0–1 мм	6,96	6,69	6,34	6,05
Степень окомкования мелочи 0–1 мм, %		89,51	89,91	90,44	90,88
Доля хорошо окомкованной шихты +3 мм, %		56,20	59,45	61,90	62,41
Эквивалентный диаметр гранул аглошихты, мм		4,19	4,29	4,47	4,47
Прочность гранул на раздавливание, г	сырых	136,5	144,6	152,5	155,1
	сухих	149,6	160,1	169	175,5

Таблица 2

Усредненные результаты спекания

Показатель		Значения при различных температурах воды (°C), подаваемой при окомковании			
		20	40	60	80
Относительная усадка слоя, %		13,1	12,3	11,7	11,4
Разрежение в вакуум-камере, кПа	до зажигания	6,5	6,4	6,2	6,2
	после зажигания	10,0	9,6	9,2	9,0
	в конце спекания (при $t_{отх\ макс}$)	5,0	5,1	4,9	5,0
Максимальная температура в вакуум-камере, °C		405	420	435	430
Продолжительность спекания, мин		19,50	19,08	18,75	18,50
Вертикальная скорость спекания, мм/мин		17,95	18,34	18,67	18,92
Выход годного (+5 мм) из спека после сбрасывания, %		70,03	72,44	73,44	73,23
Производительность по годному агломерату (после сбрасывания), т(м ² ·ч)		1,19	1,25	1,29	1,30

более высокие молекулярные силы сцепления. А одновременное снижение вязкости нагретой воды повышает ее подвижность в грануле, что обеспечивает высокую пластичность частиц в гранулах, способствуя их более плотной упаковке. Все это в совокупности повышает комкуемость шихты и приводит к улучшению гранулометрического состава и повышению прочности гранул. При этом прочность термообработанных гранул повышается более интенсивно, чем сырых, что дополнительно подтверждает положительное влияние нагретой воды на пластичность увлажненной шихты, повышение которой способствует снижению пористости гранул и развитию сил механического сцепления, обеспечивающих прочность сухих гранул. При этом необходимо отметить, что эффективность нагрева воды по мере повышения ее температуры уменьшается, что, вероятно, связано с ограниченными динамическими нагрузками на шихту в лабораторных условиях. Поэтому в промышленных условиях можно ожидать более высокой эффективности нагрева воды, особенно при повышенных температурах (до 60–80 °C).

Следует отметить, что увеличение температуры воды, подаваемой в окомкователь, на каждые 10 °C способствует росту температуры агломерационной шихты на 1,3–1,4 °C и это соответствует промышленным условиям [23] с учетом дополнительных тепловых потерь в лабораторных экспериментах. Отмеченный эффект можно использовать как дополнительный резерв для подогрева шихты.

Спекание. Усредненные результаты лабораторных спеканий агломерационной шихты, полученной при использовании воды различной температуры, представлены в **табл. 2, 3**.

Результаты лабораторных экспериментов свидетельствуют об идентичных условиях их проведения, что подтверждается стабильной по опытным сериям спеканий влажности окомкованной шихты на уровне 7,15–7,25 % (см. табл. 1), а также низкими отклонениями от установленных параметров по основности и содержанию MgO в агломерате (см. табл. 3).

Сравнение усредненных результатов лабораторных спеканий позволяет заключить, что по мере повышения температуры воды (от 20 до 80 °C), используемой при окомковании, показатели аглопроцесса и качества агломерата улучшаются, что во многом обусловлено повышением качества подготовки агломерационной шихты к спеканию.

Газопроницаемость слоя спекаемой шихты. Улучшение результатов окомкования с использованием подогретой воды, в первую очередь по прочностным свойствам гранул, отражается на снижении потерь напора в слое как до начала аглопроцесса, так и после зажигания (см. табл. 2). Последнее подтверждается уменьшением относительной усадки слоя шихты (см. табл. 2, **рис. 2**).

Продолжительность и скорость спекания. Повышение газопроницаемости агломерационной шихты приводит к увеличению количества просасываемого через спекаемый слой воздуха, росту скорости горения углерода топлива и интенсивности теплообменных процессов, результатом чего является уменьшение продолжительности аглопроцесса и, соответственно, повышение вертикальной скорости спекания (см. табл. 2). С повышением температуры воды, подаваемой в окомкователь, с 20 до 80 °C, продолжительность аглопроцесса сократилась с 19,5 до 18,5 мин, а вертикальная скорость спекания увеличилась с 17,95 до 18,92 мм/мин.

Таблица 3

Усредненные данные о химическом составе и показателях качества агломерата

Показатель		Значения при различных температурах воды (°C), подаваемой при окомковании			
		20	40	60	80
Фракционный состав агломерата после сбрасывания, %	+40 мм	17,49	20,08	17,96	21,14
	20–40 мм	13,46	14,11	16,23	12,87
	10–20 мм	21,58	22,87	25,11	25,64
	5–10 мм	17,51	15,39	14,15	13,58
	5–0 мм	29,97	27,56	26,56	26,77
Барабанная прочность, %	на удар	66,25	67,75	68,84	69,15
	на истирание	5,25	5,30	5,2	5,15
Фактический состав агломерата, %	Fe _{общ}	55,42	55,51	55,44	55,46
	FeO	12,1	12,6	12,9	12,5
	SiO ₂	7,41	7,43	7,38	7,29
	CaO	11,6	11,7	11,8	11,6
	Al ₂ O ₃	0,73	0,76	0,75	0,80
	MgO	1,63	1,55	1,64	1,61
	S	0,042	0,039	0,033	0,032
	P ₂ O ₅	0,041	0,043	0,042	0,040
Основность (CaO)/(SiO ₂), ед.	1,57	1,57	1,60	1,59	
Содержание остаточного углерода, %	0,52	0,31	0,22	0,18	

Температурно-временные условия спекания в исследуемых вариантах подготовки агломерационной шихты оценивали по температуре, измеряемой в середине слоя спекаемой шихты. Характерные кривые динамики температуры в средней части спекаемого слоя для крайних вариантов подготовки шихты с использованием в процессе окомкования воды с температурой 20 и 80 °C представлены на **рис. 3**. Усредненные

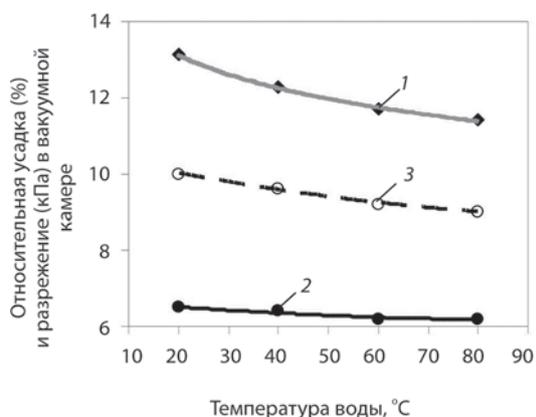


Рис. 2. Влияние температуры воды при окомковании на относительную усадку (1) слоя и разрежение в вакуумной камере до (2) и после (3) зажигания

температурно-временные параметры высокотемпературного спекания сведены в **табл. 4**.

Анализ представленных в табл. 4 и на рис. 3 данных показал, что подогрев воды, используемой при окомковании, способствует как повышению максимальных температур в зоне горения, так и увеличению продолжительности пребывания шихты в зоне жидкофазного спекания (более 1200 °C). Улучшение температурно-временных условий спекания в опытных вариантах с использованием предварительно нагретой воды объясняется повышением качества окомкования аглошихты (в первую очередь по прочности гранул), что обеспечивает сохранение газопроницаемости в процессе спекания и создает более благоприятные кинетические условия горения твердого топлива. Последнее подтверждается снижением содержания остаточного углерода в агломерате с 0,52 % в базовых условиях (при температуре воды 20 °C) до 0,18–0,22 % (см. табл. 3) в опытах с использованием при окомковании воды температурой 60–80 °C.

В экспериментах с водой температурой 60–80 °C были получены сопоставимые данные о температурно-временных параметрах спекания. Это, вероятно, связано с тем, что по мере улучшения качества окомкования и равномерности распределения газов по сечению спекаемого слоя снижаются резервы улучшения тепловых условий спекания, а количество уносимого тепла с отходящими газами увеличивается. При этом во всех опытах с повышенной температурой воды, используемой при окомковании, наблюдали стабильное содержание в агломерате 12,5–12,9 % FeO, что превышает аналогичные значения при базовых условиях (12,1 %) с температурой воды 20 °C. Это дополнительно подтверждает более благоприятные тепловые условия спекания в экспериментальных вариантах с подогревом воды и возможность снижения расхода твердого топлива без ухудшения тепловых условий агломерационного процесса, выхода годного и прочностных свойств агломерата. Об этом же косвенно свидетельствует и более высокая максимальная температура агломерационных газов в конце спекания (см. табл. 2).

Результатом улучшения тепловых и температурно-временных условий спекания является полное вовлечение шихты в расплав и более полное завершение процессов

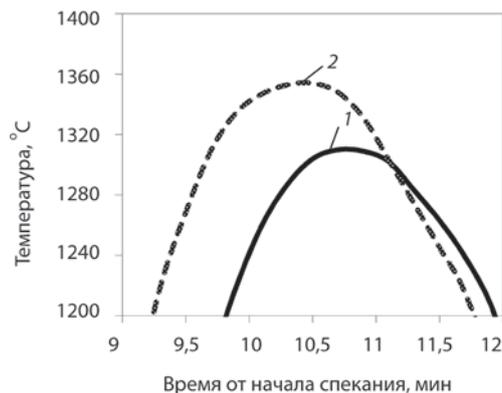


Рис. 3. Динамика температуры в средней части слоя спекаемой шихты при использовании в процессе окомкования воды температурой 20 (1) и 80 (2) °C

Таблица 4

Усредненные температурно-временные параметры высокотемпературного спекания в средней части слоя спекаемой шихты

Показатель	Значения при различных температурах воды (°С), подаваемой при окомковании			
	20	40	60	80
Максимальная температура в слое спекаемой шихты, °С	1310	1339	1358	1355
Продолжительность спекания при температуре более 1200 °С, мин	2,25	2,42	2,50	2,50

минералообразования с получением стабильного фазового состава агломерата с минимальным количеством внутренних напряжений со связкой на основе ферритов кальция и гематита при минимальной доле стекловидных фаз [2, 24–28], что отражается на выходе годного и прочности агломерата.

Выход годного и удельная производительность. Прямым следствием улучшения температурно-временных условий спекания при агломерации шихты, полученной с предварительно нагретой водой, является увеличение выхода годного агломерата (после сбрасывания) с 70,03 % (при температуре воды 20 °С) до 73,23–73,44 % (при температуре воды 60–80 °С) и, соответственно, снижение доли мелочи (0–5 мм) в агломерате. Учитывая специфику лабораторных спеканий и значительное влияние «пристеночного эффекта», в промышленных условиях можно ожидать более высокой эффективности использования предварительно нагретой воды при окомковании.

Совокупным результатом одновременного повышения скорости спекания и выхода годного агломерата (из спека) является увеличение удельной производительности (по годовому агломерату) с 1,19 т/(м²·ч) при температуре воды 20 °С до 1,30 т/(м²·ч) при максимальной температуре нагрева воды 80 °С.

Барабанная прочность агломерата. Полученный в опытах с использованием предварительно нагретой воды прирост барабанной прочности на удар (см. табл. 4) является результатом улучшения тепловых и температурно-временных условий спекания. Повышение максимальных температур и продолжительности пребывания агломерируемой шихты в температурном диапазоне от 1200 до 1400 °С, с одной стороны, способствует развитию процессов жидкофазного спекания, а с другой — минимизирует вероятность диссоциации гематита, приводя к формированию прочной силикатно-ферритной связи с минимальным числом стекловидных фаз и FeO, что согласуется с литературными данными [24–27]. При этом по прочности агломерата на истирание четкой закономерности получено не было.

Таким образом, использование при окомковании предварительно нагретой воды обеспечивает улучшение показателей окомкования и спекания, а также способствует повышению барабанной прочности агломерата. С учетом опыта ранее проведенных исследований [23], одним из эффективных вариантов подогрева воды в условиях агломерационного производства является использование тепла аглоспека,

излучаемого с поверхности спекаемого слоя на рабочей части агломашин.

Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что повышение температуры воды, используемой при подготовке шихты к спеканию, способствует улучшению качества окомкования, что в первую очередь проявляется в упрочнении гранул как в сыром состоянии, так и после их термической обработки. Полученные результаты объясняются изменением физических свойств воды по мере ее нагрева, а именно — снижением поверхностного натяжения и вязкости.

Кроме того, использование предварительно нагретой воды при окомковании является дополнительным источником тепла агломерационной шихты, обеспечивая повышение ее температуры на 1,3–1,4 °С на каждые 10 °С увеличения температуры воды.

Результаты лабораторных спеканий показали, что показатели агломерационного процесса и качества агломерата улучшаются по мере повышения температуры воды (в исследуемом диапазоне от 20 до 80 °С), используемой при окомковании, что во многом обусловлено улучшением качества подготовки агломерационной шихты. Последнее в первую очередь проявляется в улучшении газопроницаемости слоя спекаемой шихты и температурно-временных условий спекания. Результатом указанных изменений условий спекания является увеличение выхода годного и удельной производительности агломерационной установки, а также повышение барабанной прочности агломерата на удар.

Библиографический список

1. Коротич В. И., Фролов Ю. А., Бездежский Г. Н. Агломерация рудных материалов. Научное издание. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. — 400 с.
2. Пузанов В. П., Кобелев В. А. Введение в технологии металлургического структурообразования. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — 501 с.
3. Пузанов В. П., Кобелев В. А. Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз. — Екатеринбург: УрО РАН и ГНЦ РФ ОАО «Уральский институт металлов», 2001. — 634 с.
4. Ellis B. G., Loo C. E., Witchard D. Effect of ore properties on sinter bed permeability and strength // *Ironmaking & Steelmaking*. 2007. Vol. 34, Iss. 2. P. 99–108. DOI: 10.1179/174328107X165726.
5. Xuewei Lv, Xiaobo Huang, Jaqing Yin, Chenguang Bai. Indication of the measurement of surface area on iron ore granulation // *ISIJ International*. 2011. Vol. 51. No. 9. P. 1432–1438. DOI: 10.2355/isijinternational.51.1432.
6. Милохин Е. А., Батищева А. С., Шаповалов А. Н. Влияние крупности железорудного концентрата на показатели окомкования и спекания // *Черные металлы*. 2023. № 12. С. 25–31.
7. Сибатуллин С. К., Иванов А. В., Решетова И. В. Применение органических связующих компонентов в процессе агломерации железорудного сырья // *Вестник МГТУ им. Г. И. Носова*. 2010. № 4 (32). С. 30–32.
8. Шаповалов А. Н., Овчинникова Е. В., Майстренко Н. А. Повышение качества подготовки агломерационной шихты к спеканию в условиях ОАО «Уральская Сталь» // *Металлург*. 2015. № 3. С. 30–36.
9. Майстренко Н. А., Овчинникова Е. В., Шаповалов А. Н., Берсенов И. С. Повышение эффективности процесса агломерации при окомковании шихты с использованием ПАВ // *Сталь*. 2016. № 1. С. 12–15.
10. Фролов Ю. А. Агломерация: технология, теплотехника, управление, экология. — М.: Металлургиздат, 2016. — 672 с.
11. Куркин В. М., Табаков М. С., Кашкаров Е. А., Гуркин М. А. и др. Влияние извести на спекание аглошихты // *Металлург*. 2007. № 8. С. 49–52.
12. Hao Zhou, Mingxi Zhou, Damien Paul O'Dea et al. Influence of binder dosage on granule structure and packed bed properties in iron ore sintering process // *ISIJ International*. 2016. Vol. 56. No. 11. P. 1920–1928. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-298.

13. Шаповалов А. Н., Зубов С. П., Майстренко Н. А., Берсенева И. С. Исследование эффективности использования извести при производстве агломерата АО «Уральская Сталь» // *Сталь*. 2017. № 6. С. 2–6.
14. Bao G. The influence analysis of quicklime quality on output and quality of sinter in bao steel // *Metallurgical Engineering*. 2018. Vol. 5, Iss. 3. P. 131–136. DOI:10.12677/MEng.2018.53018.
15. Oyama N., Sato H., Takeda K. et al. Development of coating granulation process at commercial sintering plant for improving productivity and reducibility // *ISIJ International*. 2005. Vol. 48. No. 6. P. 817–826. DOI: 10.2355/isijinternational.45.817.
16. Mo Y. P., Pan J., Zhu D. Q. et al. Improving the granulating and sintering performance by pretreating concentrates using extrusion machine // *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vol. 148–149. P. 1351–1355. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.148-149.1351.
17. Yang C., Zhu D., Pan J., Lu L. Granulation effectiveness of iron ore sinter feeds: effect of ore properties // *ISIJ International*. 2018. Vol. 58. No. 8. P. 1427–1436. DOI: 10.2355/isijinternational.isijint-2018-141.
18. Han F., Yang Y., Wang L. et al. Strengthening granulating and sintering performance of refractory iron concentrate by pre-pelletizing // *Metals*. 2023. Vol. 13, Iss. 4. 679. DOI: 10.3390/met13040679.
19. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Наука, 1972. — 720 с.
20. Панычев А. А., Никонова А. П. Оптимизация технологических параметров на основе математических моделей при агломерации михайловских и лебединских концентратов // *Металлург*. 2008. № 10. С. 46–51.
21. ГОСТ 25471–82. Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения прочности на сбрасывание. — Введ. 01.07.1983.
22. ГОСТ 15137–77. Руды железные и марганцевые, агломераты и окатыши. Метод определения прочности во вращающемся барабане. — Введ. 01.01.1978.
23. Shapovalov A., Dema R., Kalugina O. et al. Agglomeration process productivity increasing by a sinter mix preheating // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2019. Vol. 54, Iss. 6. P. 1344–1351.
24. Loo C. E., Wan K. T., Howes V. R. Mechanical properties of natural and synthetic mineral phases in sinters having varying reduction degradation indices // *Ironmaking & Steelmaking*. 1988. Vol. 15, Iss. 6. P. 279–285.
25. Малышева Т. Я., Долицкая О. А. Петрография и минералогия железорудного сырья: учебное пособие для вузов. — М.: МИСИС, 2004. — 424 с.
26. Ширяева Е. В., Подгородецкий Г. С., Малышева Т. Я. и др. Влияние низкощелочного красного шлама на свойства и микроструктуру агломерата из шихтовых материалов ОАО «Уральская Сталь» // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014. Т. 57. № 1. С. 14–19.
27. Taira K., Matsumura M. Temperature measurement of sinter beds at high spatial and time resolution // *ISIJ International*. 2018. Vol. 58. No. 5. P. 808–814.
28. Шаповалов А. Н., Фукс А. Ю. Исследование аглопроцесса с подачей газообразного топлива в слой спекаемой шихты // *Металлург*. 2024. № 1. С. 24–30.

“*Chernye metally*”, 2024, No. 7, pp. 24–29
DOI: 10.17580/chm.2024.07.04

Influence of water temperature on results of pelletizing, sintering process indicators and sinter quality

Information about authors

E. V. Zhenin, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment¹, e-mail: zhenin.ev@misis.ru;

A. N. Shapovalov, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment¹, e-mail: alshapo@misis.ru

¹Novotroitsk branch of the National University of Science and Technology MISIS, Novotroitsk, Russia.

Abstract: The results of investigation of the influence of water temperature (in the range from 20 to 80 °C) during pelletizing on pelletizing results, sintering parameters and sinter strength are presented.

It was found that the increase in water temperature improves the quality of charge pelletizing, mainly in terms of granule strength. This is due to the change in the physical properties of water as it is heated - a decrease in surface tension and viscosity.

It is shown that water heating during pelletizing for every 10 °C provides heating of sinter charge by 1.3–1.4 °C.

It was found that sintering process parameters and sinter quality improve as the temperature of water (in the studied range) used in pelletizing increases. This is due to the improved quality of sinter charge preparation for sintering, which increases of the sintered bed porosity and temperature and time conditions of sintering.

Key words: sintering, pelletizing, water temperature, surface tension, viscosity, bed porosity, pelletizing indices, sintering indices, tumbler strength.

References

1. Korotich V. I., Frolov Yu. A., Bezdezhsky G. N. Agglomeration of ore materials. Scientific publication. Ekaterinburg : UGTU-UPI, 2003. 400 p.
2. Puzanov V. P., Kobelev V. A. Introduction to metallurgical structure formation technologies. Ekaterinburg : YpO PAH, 2005. 501 p.
3. Puzanov V. P., Kobelev V. A. Structure formation from small materials with the participation of liquid phases. Ekaterinburg : UrO RAN i GNTS OAO "Uralsky institut metallov", 2001. 634 p.
4. Ellis B. G., Loo C. E., Witchard D. Effect of ore properties on sinter bed permeability and strength. *Ironmaking & Steelmaking*. 2007. Vol. 34, Iss. 2. pp. 99–108. DOI: 10.1179/174328107X165726.
5. Xuewei Lv, Xiaobo Huang, Jaqing Yin, Chenguang Bai. Indication of the measurement of surface area on iron ore granulation. *ISIJ International*. 2011. Vol. 51. No. 9. pp. 1432–1438. DOI: 10.2355/isijinternational.51.1432.
6. Milokhin E. A., Batishcheva A. S., Shapovalov A. N. Influence of iron ore concentrate size on pelletizing and sintering parameters. *Chernye Metally*. 2023. No. 12. pp. 25–31.
7. Sibagatullin S. K., Ivanov A. V., Reshetova I. V. Application of organic binding components in the process of agglomeration of iron ore raw materials. *Vestnik MGTU imeni G. I. Nosova*. 2010. No. 4 (32). pp. 30–32.
8. Shapovalov A. N., Ovchinnikova E. V., Maystrenko N. A. Improving the preparation of the charge used for sintering at Ural Steel. *Metallurgist*. 2015. Vol. 59, Iss. 3. pp. 204–211. DOI: 10.1007/s11015-015-0085-6.
9. Maystrenko N. A., Ovchinnikova E. V., Shapovalov A. N., Bersenev I. S. Improvement in sintering efficiency by surfactant pelletization of the batch. *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46, Iss. 1. pp. 45–48. DOI: 10.3103/S0967091216010095.
10. Frolov Yu. A. Agglomeration: technology, heat engineering, management, ecology. Moscow : Metallurgizdat, 2016. 672 p.
11. Kurkin V. M., Tabakov M. S., Kashkarov E. A., Gurkin M. A. et al. Influence of lime on sintering of a sinter charge. *Metallurg*. 2007. No. 8. pp. 49–52.
12. Hao Zhou, Mingxi Zhou, Damien Paul O'Dea et al. Influence of binder dosage on granule structure and packed bed properties in iron ore sintering process. *ISIJ International*. 2016. Vol. 56. No. 11. pp. 1920–1928. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-298.
13. Shapovalov A. N., Zubov S. P., Maystrenko N. A., Bersenev I. S. Study of the efficiency of using lime in the production of sinter at Ural Steel. *Stal*. 2017. No. 6. pp. 2–6.
14. Bao G. The influence analysis of quicklime quality on output and quality of sinter in bao steel. *Metallurgical Engineering*. 2018. Vol. 5, Iss. 3. pp. 131–136. DOI: 10.12677/MEng.2018.53018.
15. Oyama N., Sato H., Takeda K. et al. Development of coating granulation process at commercial sintering plant for improving productivity and reducibility. *ISIJ International*. 2005. Vol. 48. No. 6. pp. 817–826. DOI: 10.2355/isijinternational.45.817.
16. Mo Y. P., Pan J., Zhu D. Q. et al. Improving the granulating and sintering performance by pretreating concentrates using extrusion machine. *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vol. 148–149. pp. 1351–1355. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.148-149.1351.
17. Yang C., Zhu D., Pan J., Lu L. Granulation effectiveness of iron ore sinter feeds: effect of ore properties. *ISIJ International*. 2018. Vol. 58. No. 8. pp. 1427–1436. DOI: 10.2355/isijinternational.isijint-2018-141.
18. Han F., Yang Y., Wang L. et al. Strengthening granulating and sintering performance of refractory iron concentrate by pre-pelletizing. *Metals*. 2023. Vol. 13, Iss. 4. 679. DOI: 10.3390/met13040679.
19. Vargaftik N. B. Handbook on the thermophysical properties of gases and liquids. Moscow : Nauka, 1972. 720 p.
20. Panychev A. A., Nikonova A. P. Optimization of technological parameters based on mathematical models during agglomeration of Mikhailovsky and Lebedinsky concentrates. *Metallurg*. 2008. No. 10. pp. 46–51.
21. GOST 25471–82. Iron ores, concentrates, agglomerates and pellets. Method for determination of solidity on droption. Introduced: 01.07.1983.
22. GOST 15137–77. Iron and manganese ores, agglomerates and pellets. Determination of tumbler strength. Introduced: 01.01.1978.
23. Shapovalov A., Dema R., Kalugina O. et al. Agglomeration process productivity increasing by a sinter mix preheating. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2019. Vol. 54, Iss. 6. pp. 1344–1351.
24. Loo C. E., Wan K. T., Howes V. R. Mechanical properties of natural and synthetic mineral phases in sinters having varying reduction degradation indices. *Ironmaking & Steelmaking*. 1988. Vol. 15, Iss. 6. pp. 279–285.
25. Malysheva T. Ya., Dolitskaya O. A. Petrography and mineralogy of iron ore raw materials: textbook for universities. Moscow: MISIS, 2004. 424 p.
26. Shiryayeva E. V., Podgorodetskiy G. S., Malysheva T. Y. et al. Effects of adding low-alkali red mud to the sintering batch at OAO Ural'skaya Stal'. *Steel Transl.* 2014. Vol. 44. pp. 6–10. DOI: 10.3103/S0967091214010173.
27. Taira K., Matsumura M. Temperature measurement of sinter beds at high spatial and time resolution. *ISIJ International*. 2018. Vol. 58. No. 5. pp. 808–814. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-636.
28. Shapovalov A. N., Fuks A. Y. Sintering process with gaseous fuel injection into the sintered layer. *Metallurgist*. 2024. DOI: 10.1007/s11015-024-01699-1.