

ISSN 0132-0890  
www.rudmet.ru

# ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издается с 1961 года  
(№ 1098)

06.2023



*Тема номера:  
65 лет кафедре «Технология металлов и  
материаловедение» Тверского ГТУ (стр. 25-46).*

# ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом  
«Руда и Металлы»

№ 6 (1098), июнь 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,  
А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарев, И. О. Леушин, И. П. Мазур, Т. Н. Матвеева, А. Е. Пелевин,  
Ю. Ю. Пиотровский, И. М. Потравный, А. Н. Савенок (Беларусь), А. В. Серебряков, Е. Ю. Сидорова,  
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

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» № 6 (1098), июнь 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 «Кандлер»  
150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16, стр. 66А.  
Тел. (4852) 58-76-33

Дата выхода в свет: 11.07.2023. Формат 60x90/8.  
Печ. л. 11,5. 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

### Агломерация

- А. Н. Шаповалов, А. Ю. Фукс.* Исследование агломерационного процесса с накатыванием топлива на гранулы шихты. . . . . 4

### Литейное производство

- Р. В. Гавариев, И. А. Савин, И. О. Леушин, К. Н. Гавариева.* Повышение эксплуатационной стойкости металлических форм литья под давлением. . . . . 10

### Нагрев и термообработка

- О. Б. Крючков, П. И. Маленко, Л. Г. Саранин, А. Е. Болдырев.* Выбор рационального режима нагрева крупных холодных слитков под обработку металлов давлением с использованием компьютерного моделирования. . . . . 17

### 65 лет кафедре «Технология металлов и материаловедение» Тверского ГТУ

- Д. А. Барчуков.* Научная и образовательная деятельность кафедры «Технология металлов и материаловедение» в Тверском государственном техническом университете . . . . . 25

- Д. А. Барчуков, Л. Е. Афанасьева, В. В. Измайлов, М. В. Новоселова.* Исследование структуры и износостойкости наплавленной быстрорежущей стали после поверхностной пластической деформации . . . . . 30

- А. М. Дожделев, А. Ю. Лаврентьев.* Повышение красностойкости наплавленного слоя быстрорежущей стали термомеханическими воздействиями . . . . . 36

- Л. Е. Афанасьева, К. А. Сахаров, В. В. Измайлов, М. В. Новоселова.* Неоднородность износостойкости аустенитной коррозионностойкой стали, полученной селективным лазерным плавлением . . . . . 41

### Металловедение и физика металлов

- Н. А. Феоктистов.* Формирование структуры и свойств заэвтектоидной валковой стали . . . . . 47

- А. И. Покровский.* Механизм пластической деформации графитных включений в высокопрочном чугуна при обработке давлением . . . . . 52

- С. А. Зайдес, Х. Х. Нгуен.* Влияние реверсивного поверхностного пластического деформирования на изменение зеренной структуры углеродистой стали . . . . . 61

### Порошковая металлургия

- С. И. Богодухов, Е. С. Козик, Е. В. Свиденко, А. А. Непоклоннова.* Влияние непрерывной лазерной обработки на эксплуатационные свойства деталей из порошковой стали ПК70 . . . . . 71

### Химические технологии

- Н. Л. Медяник, А. В. Смирнова, Ю. А. Бессонова, Л. Г. Коляда.* Физико-химические аспекты кислотного выщелачивания железного концентрата титаномагнетитовой руды Волковского месторождения . . . . . 76

### Контроль качества

- В. А. Иванова, Е. О. Побегалова.* Методика оценки уровня качества литейного кокса на этапах жизненного цикла . . . . . 82

### Конференции и выставки

- К. Л. Косырев, Д. Г. Еланский, М. А. Бараненко.* Итоги XVII Международного конгресса сталеплавильщиков . . . . . 87

### 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"

## Исследование агломерационного процесса с накатыванием топлива на гранулы шихты

**А. Н. Шаповалов**, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования<sup>1</sup>, канд. техн. наук, эл. почта: alshapo@misis.ru

**А. Ю. Фукс**, главный специалист<sup>2</sup>, эл. почта: a.fux@uralsteel.com

<sup>1</sup>Новотроицкий филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», Новотроицк, Россия.

<sup>2</sup>АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия.

Показано, что одним из действенных методов повышения показателей агломерационного процесса, в том числе относительно эффективности использования твердого топлива, является накатывание части коксика на гранулы окомкованной шихты. Приведены результаты лабораторных экспериментов исследования влияния накатывания коксика на гранулы окомкованной шихты на показатели процесса спекания и качество агломерата в шихтовых условиях АО «Уральская Сталь». На основании полученных результатов установлено, что наилучшие показатели агломерационного процесса по выходу годного, скорости спекания, удельной производительности и качеству агломерата достигаются при накатывании коксика на гранулы окомкованной шихты в количестве 50–75 % общего расхода на спекание. При этом показатели агломерационного процесса при доле накатываемого топлива в диапазоне от 50 до 100 % находятся на относительно постоянном уровне, значительно превышающем аналогичные значения, достигаемые при традиционном способе подачи топлива. Полученный эффект объясняется оптимальным сочетанием скорости перемещения зоны горения и продолжительности пребывания шихты в высокотемпературной зоне спекания при перераспределении топлива в объеме агломерационной шихты, что способствует более полному вовлечению рудной части шихты в процессы расплавообразования, а также обеспечивает более полное использование топлива.

**Ключевые слова:** агломерация, коксик, спекаемый слой, тепловые условия спекания, окомкование.

**DOI:** 10.17580/chm.2023.06.01

### Введение

Горение твердого топлива в спекаемом слое при агломерационном процессе влияет как на качество агломерата [1–4], так и на экологичность производства. Поскольку до 80 % энергии, потребляемой в процессе спекания, генерируется при сжигании твердого топлива [1, 2, 5, 6], актуальным направлением совершенствования технологии агломерационного производства является снижение его расхода без ухудшения показателей агломерационного процесса.

Эффективность использования твердого топлива при агломерации, определяемая полнотой его сгорания, зависит от реакционной способности, технического и фракционного состава топлива, а также его распределения в спекаемом слое как по высоте, так и в структуре зерен окомкованной шихты. В ходе исследований влияния крупности топлива на показатели агломерационного процесса в различных шихтовых условиях установлено, что при спекании тонкоизмельченных концентратов крупность коксовой мелочи должна находиться в диапазоне 0,5–3,0 мм [1, 2, 7–9] при минимальном количестве частиц менее 0,5 мм и крупнее 3,0 мм.

В зависимости от особенностей физико-химических свойств и минералогического состава агломерируемой шихты и топлива существуют оптимальные условия по крупности и распределению частиц топлива в макроструктуре окомкованных зерен шихты, обеспечивающие благоприятные температурно-тепловые условия в спекаемом слое при минимальном расходе коксика [1, 2, 9–11]. Поэтому

агломерационное производство развивается как по пути совершенствования технологии подготовки твердого топлива к спеканию с целью оптимизации его фракционного состава [11–13], так и рационального распределения частиц топлива по гранулам окомкованной шихты и высоте спекаемого слоя [11, 14–20]. Последнее направление является более перспективным для максимально полного использования имеющихся источников коксовой мелочи, образующейся в процессе производства и подготовки кокса к доменной плавке.

Вариант изменения способа подачи твердого топлива в пользу его накатывания на частично или полностью окомкованную шихту предложен для решения проблемы снижения эффективности горения коксовой мелочи с повышением доли тонкозернистых концентратов вследствие «закатывания» коксовой мелочи и ухудшения кинетических условий сгорания топлива. При подаче коксовой мелочи (до 100 % расхода) на частично окомкованную шихту в последней стадии окомкования обеспечивается накатывание мелких фракций коксика на готовые гранулы шихты, что создает благоприятные условия взаимодействия частиц топлива с кислородом. Результатом такого перераспределения топлива является повышение интенсивности и полноты его сгорания, а также увеличение максимальных температур в зоне горения. При этом, как и для любого многофакторного процесса, результат влияния отдельной подачи топлива определяется конкретными шихтовыми и технологическими условиями, что подтверждается

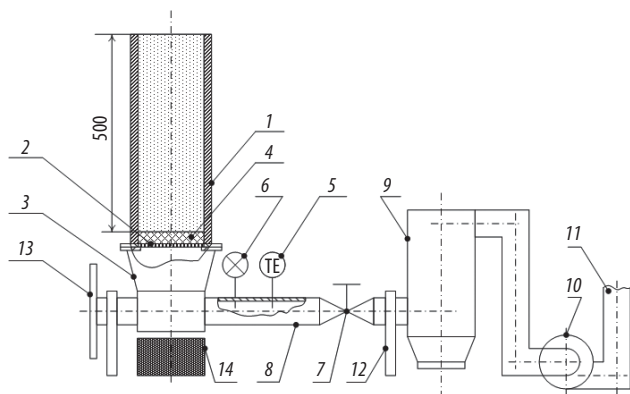


Схема агломерационной установки:

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

различными результатами лабораторных и промышленных исследований [1, 6–12, 14–21].

Целью данной работы является исследование влияния накатывания коксика на гранулы окомкованной шихты на показатели процесса спекания и качество агломерата в шихтовых условиях АО «Уральская Сталь».

#### Материал и методика исследования

Исследования проводили в металлургической лаборатории АО «Уральская Сталь», оборудованной барабанным окомкователем (диаметр — 0,6 м, длина — 1,2 м) и агломерационной установкой (диаметр спекательной чаши — 210 мм, высота слоя — до 500 мм, разрежение — до 20 кПа), схема которой представлена на **рисунке**.

В качестве компонентов шихты использовали материалы, применяемые для производства агломерата в условиях АО «Уральская Сталь» (по состоянию на 2022 г.): концентрат Лебединского ГОКа (ЛГОКа), агломерационные руды Михайловского ГОКа (МГОКа) и Бакальского рудоуправления (БРУ), известняк Аккермановского месторождения и коксовую мелочь коксохимического производства АО «Уральская Сталь».

Для достижения поставленной цели исследования провели лабораторные эксперименты из пяти серий опытов с различной долей коксика, подаваемого в конце окомкования, — от 0 (стандартная технология подачи коксика в аглошихту при смешивании) до 100 % расчетного расхода топлива с шагом 25 %.

Состав опытной шихты рассчитывали для получения агломерата основностью  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,6$  с содержанием 1,6 % MgO (характерно для условий АО «Уральская Сталь») при постоянном соотношении концентрата ЛГОКа, руд МГОКа, БРУ, обеспечивающем требуемый уровень MgO. Расход твердого топлива в базовых условиях подбирали экспериментально из условия получения в агломерате регламентируемого уровня содержания 11–13 % FeO.

Результаты расчета шихты, полученные для содержания в ней горючего углерода на уровне 4,2 %, представлены в **табл. 1**.

Компоненты агломерационной шихты дозировали в соответствии с результатами расчета шихты на экспери-

Таблица 1

#### Результаты расчета шихты на лабораторные спекания

Материал	Расход на спекание, кг		Расход на 1 т агломерационного спека, кг/т
	Сухой материал	Материал естественной влажности	
Агломерационная руда МГОКа	3,60	3,90	157,13
Концентрат ЛГОКа	16,40	17,76	715,82
Известняк	5,21	5,28	212,90
Агломерационная руда БРУ	2,24	2,30	92,60
Возврат	6,20	6,20	250,00
Коксик	1,69	1,79	57,70
Итого (без возврата)	29,14	31,04	1236,19

ментальные спекания (см. табл. 1). Для снижения влияния нестабильности гранулометрического состава компонентов шихты на результаты окомкования и показатели агломерационного процесса проводили додрабливание крупных фракций железных руд (>10 мм), коксика и известняка (>3 мм).

Смешивание, увлажнение и окомкование агломерационной шихты осуществляли в барабанном окомкователе в идентичных условиях при соблюдении режима увлажнения, практикуемого на производстве:

- смешивание без увлажнения в течение 2 мин;
- окомкование с увлажнением агломерационной шихты до оптимальной влажности в течение 2 мин;
- подача твердого топлива (в количестве, предусмотренном планом эксперимента) на поверхность окомкованной шихты;
- окомкование без увлажнения в течение 1 мин, обеспечивающее накатывание частиц топлива на гранулы окомкованной шихты.

Расход воды в процессе окомкования подбирали с целью достижения оптимальной влажности 7,0–7,5 %, характерной для шихтовых условий работы АО «Уральская Сталь» [12, 22–24]. Для оценки результатов окомкования и идентичности проведения опытов проводили отбор проб окомкованной шихты с последующим определением влажности, гранулометрического состава и эквивалентного (среднегармонического) диаметра гранул.

Подготовленную к спеканию агломерационную шихту загружали в агломерационную чашу, куда предварительно укладывали слой постели из возврата крупностью 5–10 мм массой 2 кг (30–40 мм по высоте чаши). Высоту спекаемого слоя поддерживали постоянной на уровне 400 мм исходя из технических возможностей агломерационного цеха АО «Уральская Сталь». После включения контрольно-измерительной аппаратуры осуществляли запуск вакуумного насоса для создания разрежения под колосниковой решеткой и зажигание коксика верхнего слоя агломерационной шихты в течение 1–1,5 мин.

В процессе спекания фиксировали основные параметры процесса: разрежение в вакуум-камере (после включения

вакуумного насоса, после зажигания и после завершения спекания), температуру в вакуум-камере (максимальное значение), продолжительность спекания и величину усадки.

После завершения агломерационного процесса и охлаждения спека до 100 °С полученный агломерат выгружали из аглочаши и определяли массу спека. Полученный агломерационный спек подвергали троекратному сбрасыванию (по ГОСТ 25471–82 [25]) с последующим определением гранулометрического состава и выхода годного. Годный агломерат подвергался механическим испытаниям, заключающимся в определении прочности на удар и истирание во вращающемся барабане в соответствии с ГОСТ 15137–77 [26].

При выполнении исследования в каждой серии экспериментов проводили не менее трех спеканий с целью исключения систематических ошибок и достижения воспроизводимости результатов.

**Результаты эксперимента и их обсуждение**

Усредненные результаты экспериментов по изучению влияния отдельной подачи топлива на показатели спекания и качество агломерата представлены в **табл. 2–4**.

Представленные в табл. 2–4 данные свидетельствуют об идентичных условиях проведения экспериментов, что подтверждается постоянным значением влажности окомкованной шихты (7,05–7,30 %) по опытным сериям спеканий, а также низким отклонением от установленных параметров по основности и содержанию MgO в агломерате.

Сравнение усредненных результатов экспериментов с традиционной (серия 1) и отдельной (серии 2–5) подачей твердого топлива позволяет заключить, что показатели агломерационного процесса и качества агломерата при отдельной подаче твердого топлива превосходят аналогичные показатели, достигаемые при подаче коксика на стадии смешивания.

Наилучшие показатели агломерационного процесса по выходу годного, скорости спекания, удельной производительности и качеству агломерата достигаются при накатывании коксика на гранулы окомкованной шихты в количестве 50–75 % общего расхода на спекание. В целом показатели процесса при доле накатываемого топлива в диапазоне от 50 до 100 % находятся на относительно постоянном

уровне, значительно превышающем аналогичные значения, получаемые при традиционном способе подачи топлива.

Одним из главных факторов, определяющим улучшение результатов агломерационного процесса при отдельной подаче коксика, является повышение качества окомкованной шихты, определяющим критерием которого является содержание мелочи (фракция 0–1 мм) в шихте. Так, с увеличением до 75 % (серии 1–4) доли коксика, подаваемого на заключительной стадии окомкования, в окомкованной шихте наблюдается стабильное снижение содержания фракции менее 1 мм с 7,4 до 2,83 % при одновременном повышении степени окомкования мелочи с 88,78 до 95,71 %. Положительная динамика качества окомкования при доле накатываемого коксика до 75 % отражается на увеличении эквивалентного диаметра гранул окомкованной шихты с 4,09 до 4,53 мм. В последней серии опытных спеканий с полным накатыванием топлива отмечена стабилизация результатов окомкования. Влияние отдельной подачи твердого топлива на результаты окомкования объясняется тем, что частицы коксика плохо смачиваются и ухудшают комкованность шихты [1, 27], поэтому с переносом подачи коксика на заключительную стадию окомкования улучшаются условия формирования гранул агломерационной шихты и их прочностные свойства, а подаваемые на поверхность уже сформированных гранул частицы коксика не могут существенно изменить гранулометрический состав аглошихты, влияя только на ее макроструктуру.

Результат визуального исследования макроструктуры гранул окомкованной шихты позволил выделить 4 вида гранул:

- 1-й вид — гранулы на основе частиц коксика (центр гранулы) с адгезионным слоем железорудных материалов;
- 2-й вид — гранулы на основе частиц кусковой руды и возврата (центр гранулы) с адгезионным слоем из железорудных материалов и коксовой мелочи, закатанной в слой;
- 3-й вид — гранулы на основе железорудного материала (основа) с налипшими частицами коксовой мелочи;
- 4-й вид — свободные частицы крупной коксовой мелочи.

При традиционном способе подачи твердого топлива при смешивании в составе окомкованной шихты

Таблица 2

**Усредненные результаты подготовки агломерационной шихты к спеканию**

Показатель	Серия экспериментов					
	1	2	3	4	5	
Доля накатываемого топлива, %	0,00	25,00	50,00	75,00	100,00	
Влажность шихты, %	7,30	7,05	7,15	7,10	7,20	
Фракционный состав окомкованной шихты, %	+10 мм	5,23	4,71	5,30	5,36	4,83
	5–10 мм	18,74	22,24	22,60	22,71	23,31
	3–5 мм	30,89	33,70	36,65	37,90	38,24
	1–3 мм	37,75	34,17	31,50	31,20	30,77
	0–1 мм	7,40	5,18	3,95	2,83	2,84
Степень окомкования мелочи фракции 0–1 мм, %	88,78	92,14	94,00	95,71	95,69	
Эквивалентный диаметр гранул окомкованной шихты, мм	4,09	4,31	4,47	4,53	4,51	

Таблица 3

**Условия и усредненные параметры спекания**

Показатель	Серия экспериментов					
	1	2	3	4	5	
<i>Условия спекания</i>						
Доля накачиваемого топлива, %	0	25	50	75	100	
Содержание углерода в шихте, %	4,2					
Основность (CaO/SiO <sub>2</sub> )	1,6					
Содержание MgO, %	1,6					
Высота спекаемого слоя, мм	400					
<i>Контролируемые и расчетные параметры спекания</i>						
Относительная усадка слоя, %	11,3	10,5	11,3	10,8	11,0	
Разрежение в вакуум-камере, кПа	до зажигания	7,3	6,9	6,4	6,6	6,7
	после зажигания	10,8	10,1	9,7	9,5	9,6
	в конце спекания (при $t_{отх макс}$ )	5,2	5,3	5,1	5,0	5,2
Максимальная температура в вакуум-камере, °С	370,0	405,0	400,0	385,0	380,0	
Длительность спекания, мин	21,5	19,0	18,3	18,4	18,5	
Скорость спекания, мм/мин	18,6	21,1	21,8	21,7	21,6	
Выход годного (+5 мм) из спека после сбрасывания, %	70,55	74,49	78,38	77,57	77,20	
Производительность по годовому агломерату (после сбрасывания), т/(м <sup>2</sup> ·ч)	1,36	1,58	1,67	1,64	1,65	

Таблица 4

**Усредненные данные химического состава и показателей качества агломерата**

Показатель	Серия экспериментов					
	1	2	3	4	5	
Доля накачиваемого топлива, %	0,00	25,00	50,00	75,00	100,00	
Фракционный состав агломерата после сбрасывания, %	+40 мм	10,36	14,25	16,05	15,58	15,29
	20–40 мм	15,23	14,79	15,52	16,66	15,29
	10–20 мм	24,55	23,89	26,57	26,12	26,55
	5–10 мм	20,41	21,56	20,25	19,21	20,07
	5–0 мм	29,45	25,51	21,62	22,43	22,80
Барabanная прочность, %	на удар	65,15	67,33	69,82	69,11	68,45
	на истирание	5,41	5,15	4,84	4,95	5,13
Химический состав агломерата, %	Fe общее	55,41	55,32	55,22	55,51	55,45
	FeO	11,42	12,61	13,10	13,50	13,30
	SiO <sub>2</sub>	7,46	7,49	7,38	7,26	7,33
	CaO	11,73	12,03	12,03	11,93	11,73
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,89	0,81	0,88	0,79	0,84
	MgO	1,59	1,61	1,55	1,53	1,55
	S	0,045	0,038	0,035	0,034	0,032
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,041	0,039	0,038	0,041	0,045
Основность (CaO/SiO <sub>2</sub> )	1,57	1,61	1,63	1,64	1,60	
Содержание остаточного углерода, %	0,53	0,34	0,14	0,05	0,05	

превалируют частицы 1-го и 2-го видов с небольшим количеством частиц 3-го вида. По мере увеличения доли накачиваемого топлива происходит замещение гранул 1-го и 2-го видов на гранулы 3-го и 4-го видов, а при полном переносе подачи твердого топлива на заключительную стадию окомкования макроструктура окомкованной шихты представлена только гранулами 3-го и 4-го видов.

Таким образом, раздельная подача твердого топлива приводит к перераспределению топливных частиц на поверхность гранул агломерационной шихты, что облегчает доступ кислорода и ускоряет горение коксовой мелочи,

а также способствует локальному росту температуры в зоне горения и более полному сгоранию топлива.

Подтверждением улучшения кинетических условий горения твердого топлива является значительное сокращение продолжительности спекания (на 11,6–15,3 % (отн.)) и пропорциональный рост скорости спекания (на 13,2–18,1 % (отн.)) в сериях опытов с накачиванием топлива (см. табл. 3).

Однако, несмотря на устойчивую динамику по улучшению результатов окомкования при увеличении доли накачиваемого топлива до 75 %, снижение продолжительности спекания (и рост скорости спекания) наблюдаются только

при повышении доли накачиваемого топлива до 50 %, а дальнейшее увеличение доли топлива, подаваемого в конце окомкования, практически не влияет на интенсификацию аглопроцесса. Выявленная закономерность, очевидно, связана с достижением предела скорости нагрева шихты до температуры воспламенения коксика, поэтому потенциально более высокая газопроницаемость спекаемого слоя не переходит в увеличение скорости горения и спекания. При этом дополнительным эффектом от повышения газопроницаемости и улучшения кинетических условий горения топлива является снижение содержания серы (с 0,045 до 0,032–0,038 %) в агломерате, которая в ходе спекания в большей степени уносится с отходящими газами.

Отмеченные закономерности подтверждаются данными о разрежении в вакуумной камере после зажигания и максимальной температуре в вакуум-камере в конце спекания (см. табл. 3). Так, улучшение газопроницаемости спекаемого слоя с увеличением доли накачиваемого топлива от 0 до 75 % подтверждается уменьшением разрежения в вакуум-камере после зажигания с 10,8 до 9,5 кПа. При этом изменение максимальной температуры в вакуумной камере в конце спекания имеет экстремальный характер, достигая максимальных значений при доле накачиваемого топлива 25–50 %.

Таким образом, при доле накачиваемого топлива 25–50 % наблюдается соответствие между скоростью нагрева агломерационной шихты и скоростью спекания, что отражается как на снижении разрежения (после зажигания), так и на повышении теплового уровня в спекаемом слое. Дальнейшее увеличение доли накачиваемого топлива и газопроницаемости спекаемого слоя ухудшает тепловые условия спекания вследствие запаздывания скорости нагрева агломерационной шихты и увеличения доли тепла, теряемого с отходящими газами. При этом следует отметить, что в производственных условиях при стабильном поддержании температуры шихты на уровне более 60 °С и отсутствии зоны переувлажнения в спекаемом слое можно ожидать смещение оптимальной доли накачиваемого топлива в сторону увеличения до 75 % и более.

Следствием оптимального сочетания тепловых и скоростных условий спекания при повышении доли накачиваемого топлива до 50 % является увеличение выхода годного агломерата (после сбрасывания) и производительности (см. табл. 3). При этом отмеченный ранее эффект отставания скорости нагрева агломерационной шихты от потенциальных возможностей по газопроницаемости при увеличении доли накачиваемого топлива до 75 % и более приводит к стабилизации как продолжительности спекания (см. табл. 3), так и выхода годного (на уровне ~77–78 %), а следовательно, и удельной производительности (на уровне ~1,64–1,67) т/м<sup>2</sup>·ч).

Сохранение благоприятных тепловых и температурно-временных условий спекания при высокой доле накачиваемого топлива обеспечивается в результате увеличения степени сгорания углерода топлива, о чем свидетельствует значительное снижение содержания остаточного углерода в агломерате с 0,53 до 0,05 %. Эффект повышения полноты сгорания топлива при переходе на позднюю подачу коксика влияет не только на улучшение тепловых условий спекания, но и на степень развития восстановительных процессов,

что подтверждается ростом содержания FeO (см. табл. 4). Данный факт позволяет рассматривать возможность снижения расхода топлива (особенно при оптимальной доле накачиваемого топлива) без ухудшения тепловых условий спекания, выхода годного и прочностных свойств агломерата.

Следствием улучшения тепловых условий спекания при применении технологии частичного накачивания топлива стало сокращение доли фракции 0–5 мм в агломерате после сбрасывания с 29,45 % (при традиционном способе подачи топлива) до 22,43–25,51 % в сериях опытов 2–5 (см. табл. 4), а также повышение барабанной прочности агломерата, особенно к ударным нагрузкам. При этом при увеличении доли накачиваемого топлива до 75 и 100 % (серии 4 и 5) наблюдается тенденция к повышению доли мелочи и ухудшению барабанной прочности, что объясняется снижением продолжительности пребывания спекаемой шихты в высокотемпературной зоне образования расплава при повышенной скорости сгорания коксика, что отмечено и в других исследованиях [6, 10, 17].

### Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что наилучшие показатели агломерационного процесса по выходу годного, скорости спекания, удельной производительности и качеству агломерата достигаются при накачивании коксика на гранулы окомкованной шихты в количестве 50–75 % общего расхода на спекание. При этом показатели процесса при доле накачиваемого топлива в диапазоне от 50 до 100 % находятся на относительно постоянном уровне, значительно превышающем аналогичные значения, достигаемые при традиционном способе подачи топлива. Полученный эффект объясняется оптимальным сочетанием скорости перемещения зоны горения и продолжительности пребывания шихты в высокотемпературной зоне спекания при перераспределении топлива в объеме агломерационной шихты, что способствует более полному вовлечению ее рудной части в процессы образования расплава, а также обеспечивает более полное использование топлива.

Регулирование количества накачиваемого топлива позволяет управлять структурой гранул окомкованной шихты, обеспечивая оптимальное сочетание скорости горения и тепловых условий спекания (для конкретных производственных условий), а следовательно, и достижение наилучших показателей по выходу годного, производительности и прочностным свойствам агломерата. ■

### Библиографический список

1. *Коротич В. И., Фролов Ю. А., Бездежский Г. Н.* Агломерация рудных материалов. Научное издание. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2003. — 400 с.
2. *Фролов Ю. А.* Агломерация: технология, теплотехника, управление, экология. — М. : Metallurgizdat, 2016. — 672 с.
3. *Xu H. L., Pan G. Y., Shao Y. J.* et al. Analysis of energy consumption evaluation indicator for iron and steel production // *Energy Metall Ind.* 2017. Vol. 36, Iss. 2. P. 3–7.
4. *Huang X. X., Fan X. H., Chen X. L.* et al. Optimisation model of fuel distribution in materials bed of iron ore sintering process // *Ironmaking & Steelmaking.* 2019. Vol. 46, Iss. 7. P. 649–655.
5. *Zhou J. C., Li X. P., Shangguan F. Q.* et al. Status of energy consumption and energy saving technical measures of sintering process in China // *Energy Metall Ind.* 2010. Vol. 29, Iss. 2. P. 23–26.



6. Hou P., Choi S., Choi E., Kang H. Improved distribution of fuel particles in iron ore sintering process // *Ironmaking & Steelmaking*. 2011. Vol. 38, Iss. 5. P. 379–385.
7. Тен С. В., Михалеви́ч А. Г., Боранбаев Б. М. и др. Повышение эффективности использования топлива при агломерации // *Сталь*. 1980. № 10. С. 868–870.
8. Титов В. И., Искалин В. И., Григорьев Н. Е. и др. Оптимизация гранулометрического состава твердого агломерационного топлива // *Металлург*. 2005. № 1. С. 15, 16.
9. Dabbagh A., Moghadam A., Naderi S., Hamdi M. A study on the effect of coke particle size on the thermal profile of the sinters produced in Esfahan Steel Company (ESCO) // *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2013. Vol. 113. P. 941–945.
10. Zhou M., Han S., Wang L. et al. Effect of size distribution of coke breeze on sintering performance // *Steel Research Int.* 2015. Vol. 86, Iss. 11. P. 1242–1251.
11. Коршиков Г. В., Шаров С. И., Лукашов Г. Г. и др. Влияние способа подачи топлива, его вида и крупности на показатели процесса спекания руд КМА. Сообщение 2 // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1971. № 8. С. 37–39.
12. Шاپовалов 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.
13. Фролов Ю. А. Состояние и перспективы развития технологии производства агломерата. Часть 1. Подготовка компонентов агломерационной шихты к спеканию // *Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации*. 2017. № 4. С. 33–41.
14. Коршиков Г. В., Шаров С. И., Лукашов Г. Г. и др. Влияние способа подачи топлива, его вида и крупности на показатели процесса спекания руд КМА. Сообщение 1 // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1971. № 6. С. 39–42.
15. Колокольцев Б. И., Ляхов П. А., Кретинин В. И. Накатывание топлива на гранулы окомкованной шихты // *Металлург*. 1979. № 1. С. 9–11.
16. Ефимов С. П., Невмержицкий Е. В., Зевин С. Л. и др. Улучшение показателей работы аглофабрики за счет подачи топлива в конце окомкования шихты // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1979. № 2. С. 25–28.
17. Arikata Y., Yamamoto K., Sassa Y. Effect of coke breeze addition timing on sintering operation // *ISIJ International*. 2013. Vol. 53, No. 9. P. 1523–1528.
18. Zhou M., Wang Y., Zhao D. et al. A Study of double layer pre-sintering toward super-high bed height // *11<sup>th</sup> International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. 2020. P. 639–651.
19. Zhong Q., Liu H., Xu L. et al. An efficient method for iron ore sintering with high-bed layer: double-layer sintering // *Journal of iron and steel research international*. 2021. Vol. 28, Iss. 11. P. 1366–1374.
20. Siddhartha Shrestha, Jin Xu, Aibing Yu, Zongyan Zhou. Numerical simulation of fuel layered distribution iron ore sintering technology // *Ironmaking & Steelmaking*. 2022. Vol. 49, Iss. 1. P. 83–100. DOI: 10.1080/03019233.2021.1968259.
21. Феоктистов А. В., Одинцов А. А. Повышение эффективности использования твердого топлива при двухслойной агломерации // *Металлург*. 2014. № 6. С. 66–73.
22. 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.
23. Майстренко Н. А., Овчинникова Е. В., Шاپовалов А. Н., Берсенева И. С. Повышение эффективности процесса агломерации при окомковании шихты с использованием ПАВ // *Сталь*. 2016. № 1. С. 12–15.
24. Shapovalov A. N., Dema R. R., Nefedyev S. P. Efficiency improvement of sintering as a result of surface-active substance use in pelletizing at the JSC "Ural Steel" // *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 870. P. 507–515.
25. ГОСТ 25471-82. Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения прочности на сбрасывание. — Введ. 01.07.1983.
26. ГОСТ 15137-77. Руды железные и марганцевые, агломераты и окатыши. Метод определения прочности во вращающемся барабане. — Введ. 01.01.1978.
27. Лузанов В. П., Кобедев В. А. Введение в технологии металлургического структурирования. — Екатеринбург: Урал. отд., Росс. акад. наук, 2005. — 501 с.

"Chernye metally", 2023, No. 6, pp. 4–9  
DOI: 10.17580/chm.2023.06.01

#### Effect of coke breezing addition timing on pelletizing and sintering results

##### Information about authors

A. N. Shapovalov, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment <sup>1</sup>, e-mail: alshapo@misis.ru;

A. Yu. Fuchs, Leading Specialist <sup>2</sup>, e-mail: a.fux@uralsteel.com

<sup>1</sup> Novotroitsk branch of the National University of Science and Technology MISIS, Novotroitsk, Russia.

<sup>2</sup> Ural Steel, Novotroitsk, Russia.

**Abstract:** It is shown that one of the most effective methods of increasing sinter process performance, including in terms of solid fuel efficiency, is late feeding of coke breeze to the charge granules in the pelletizing process. The results of laboratory experiments to study the effect of late feeding of coke breeze on sintering granules on sintering process indicators and quality of sinter in the charge conditions of JSC "Ural Steel" are presented. Based on the results obtained, it was found that the best sintering process indicators in terms of yield, sintering rate, specific productivity and quality of sinter are achieved when feeding 50–75 % (of the total consumption) of coke breeze at the end of pelletizing. Further increase in the share of coke breeze fed at the end of pelletizing up to 100% does not lead to improvement in the sintering process. The resulting effect can be explained by an optimal combination of the rate of movement of the combustion zone and the duration of the charge in the high-temperature sintering zone. This contributes to a more complete involvement of iron-ore materials in the melting processes, as well as ensures a more complete use of solid fuel.

**Keywords:** sintering, coke, sintered layer, thermal conditions of sintering, pelletizing, breezing.

##### References

1. Korotich V. I., Frolov Yu. A., Bezdezhskiy G. N. Agglomeration of ore materials. Scientific edition. Yekaterinburg: UGTU-UI, 2003. 400 p.
2. Frolov Yu. A. Agglomeration: technology, heat engineering, management, ecology. Moscow: Metallurgizdat, 2016. 672 p.
3. Xu H. L., Pan G. Y., Shao Y. J. et al. Analysis of energy consumption evaluation indicator for iron and steel production. *Energy Metall Ind.* 2017. Vol. 36, Iss. 2. pp. 3–7.
4. Huang X. X., Fan X. H., Chen X. L. et al. Optimisation model of fuel distribution in materials bed of iron ore sintering process. *Ironmaking & Steelmaking*. 2019. Vol. 46, Iss. 7. pp. 649–655.
5. Zhou J. C., Li X. P., Shangguan F. Q. et al. Status of energy consumption and energy saving technical measures of sintering process in China. *Energy Metall Ind.* 2010. Vol. 29, Iss. 2. pp. 23–26.
6. Hou P., Choi S., Choi E., Kang H. Improved distribution of fuel particles in iron ore sintering process. *Ironmaking & Steelmaking*. 2011. Vol. 38, Iss. 5. pp. 379–385.
7. Ten S. B., Mikhalevich A. G., Boranbaev B. M. et al. Improvement of fuel efficiency in agglomeration. *Stal*. 1980. No. 10. pp. 868–870.
8. Titov V. I., Iskalin V. I., Grigoryev N. E. et al. Optimization of granulometric composition of solid sintering fuel. *Metallurg*. 2005. No. 1. pp. 15, 16.
9. Dabbagh A., Moghadam A., Naderi S., Hamdi M. A study on the effect of coke particle size on the thermal profile of the sinters produced in Esfahan Steel Company (ESCO). *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2013. Vol. 113. pp. 941–945.
10. Zhou M., Han S., Wang L. et al. Effect of size distribution of coke breeze on sintering performance. *Steel Research Int.* 2015. Vol. 86, Iss. 11. pp. 1242–1251.
11. Korshikov G. V., Sharov S. I., Lukashov G. G. et al. Influence of the method of fuel feeding, its type and fineness on indicators of the KMA ores sintering process. Message 2. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1971. No. 8. pp. 37–39.
12. Shapovalov A. N., Ovchinnikova E. V., Maistrenko N. A. Improving the preparation of the charge used for sintering at Ural Steel. *Metallurgist*. 2015. Vol. 59, Iss. 3. pp. 204–211.
13. Frolov Yu. A. State and prospects for the development of sinter production technology. Part 1. Preparation of sinter charge components for sintering. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii*. 2017. No. 4. pp. 33–41.
14. Korshikov G. V., Sharov S. I., Lukashov G. G. et al. Influence of the method of fuel feeding, its type and fineness on indicators of the KMA ores sintering process. Message 1. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1971. No. 6. pp. 39–42.
15. Kolokol'tsev B. I., Lyakhov P. A., Kretinin V. I. Rolling fuel on pelletized charge granules. *Metallurg*. 1979. No. 1. pp. 9–11.
16. Efimov S. P., Nevmerzhtskiy E. V., Zevin S. L. et al. Improvement of the sinter plant's performance by feeding fuel at the end of charge pelletization. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1979. No. 2. pp. 25–28.
17. Arikata Y., Yamamoto K., Sassa Y. Effect of coke breeze addition timing on sintering operation. *ISIJ International*. 2013. Vol. 53, No. 9. pp. 1523–1528.
18. Zhou M., Wang Y., Zhao D. et al. A Study of double layer pre-sintering toward super-high bed height. *11<sup>th</sup> International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. 2020. pp. 639–651.
19. Zhong Q., Liu HB., Xu LP. et al. An efficient method for iron ore sintering with high-bed layer: double-layer sintering. *Journal of iron and steel research international*. 2021. Vol. 28, Iss. 11. pp. 1366–1374.
20. Siddhartha Shrestha, Jin Xu, Aibing Yu, Zongyan Zhou. Numerical simulation of fuel layered distribution iron ore sintering technology. *Ironmaking & Steelmaking*. 2021. Vol. 49, Iss. 1. pp. 83–100. DOI: 10.1080/03019233.2021.1968259.
21. Feoktistov A. V., Odintsov A. A. Making more efficient use of solid fuel in two-layer sintering. *Metallurgist*. 2014. Vol. 58. pp. 469–477.
22. Panichev A. A., Nikonova A. P. Use of mathematical models to optimize process parameters in the sintering of Mikhailovskii and Lebedinskii concentrates. *Metallurgist*. 2008. Vol. 52, Iss. 9. pp. 544–551. DOI: 10.1007/s11015-009-9098-3.
23. Maistrenko N. A., Ovchinnikova E. V., Shapovalov A. N., Berseneva I. S. Improvement in sintering efficiency by surfactant pelletization of the batch. *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46, Iss. 1. pp. 45–48.
24. Shapovalov A. N., Dema R. R., Nefedyev S. P. Efficiency improvement of sintering as a result of surface-active substance use in pelletizing at the JSC "Ural Steel". *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 870. pp. 507–515.
25. GOST 25471-82. Iron ores, concentrates, agglomerates and pellets. Method for the determination of solidity on droption. Introduced: 01.07.1983.
26. GOST 15137-77. Iron and manganese ores, agglomerates and pellets. Determination of tumbler strength. Introduced: 01.01.1978.
27. Puzanov V. P., Kobelev V. A. Introduction to metallurgical structuring technology. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2005. 501 p.