

Харченко А.С., Павлов А.В., Сибатуллин С.К., Харченко Е.О., Сысоев В.И., Магасумов Г.З., Вакуленко А.И.

ДЕЙСТВИЕ НА ХОД ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА ОКАТЫШЕЙ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ ИЗ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ ВЗАМЕН КОНЦЕНТРАТАМ СКАРНОВОГО ТИПА, ПРИ НОМИНАЛЬНОЙ ДОЛЕ В ШИХТЕ

Аннотация. Исследовали два периода работы доменной печи объемом 1370 м³ длительностью 31 и 30 номинальных суток. Особенностью первого периода было преимущественное использование окатышей, произведенных в Соколовско-Сарбайском горно-производственном объединении из концентрата скарного типа, во втором – произведенные в Михайловском ГОКе из железистых кварцитов. Рассчитанными показателями диагностировали действие этого на различные стороны развивающихся в доменной печи процессов. В частности, выявили следующее: развитие прямого восстановления Fe из FeO снизилось на 1,7 абс. %; степень восстановления водородом увеличилась на 2,4 абс. %; средняя степень уравнивания материалов подъёмной силой газового потока от горизонта фурм до поверхности шихты снизилась на 1,92 отн. %; рост динамического напора поднимающихся от горна к колошнику печных газов, приведенного к пустому сечению в рабочих условиях по температуре и давлению, составил: у поверхности слоя шихты – 2,58, в нижней части заплечиков – 3,03%; длительность движения кокса до зоны горения уменьшилась на 0,59%; кинетическая энергия истечения дутья из фурм увеличилась на 3,35 %; протяженность рыхлой части фурменного очага к осевой части горна возросла на 0,64%.

На рассмотренной доменной печи при увеличении доли окатышей из железосиликатного концентрата с 7,02 до 25,45%, исключении окатышей из магнетитового концентрата от 12,23%, без изменения удельного расхода скипового кокса повысили производительность печи на 0,68%, потребление суммарного кокса на 1,6 кг/т, всего топлива-восстановителя на 4,84 кг/т чугуна.

Ключевые слова: металлургический процесс, чугун, кокс, окатыши, магнетит, концентрат, железистый кварцит, восстановление, теплопередача, движение газов, движение материалов к горну

Введение

В современных условиях исследование металлургического процесса важно для совершенствования технологий промышленности России [1]. Окатыши относятся к основным компонентам среди шихтовых материалов при её осуществлении [2-5].

Выявлена роль растрескивания окатышей применением методологии клеточных автоматов [3]. Проведением исследования получено, что снижение окисленности железа в пористой структуре окатышей происходит в две стадии. На первой стадии процесса скорость восстановления зависит исключительно от поверхности контакта фаз, а после полного восстановления материала поверхности определяется диффузией внутри минеральной составляющей окатыша.

Установлено, что прочность окатышей при восстановлении снижается до $0,21 \pm 0,40$ от исходной прочности на сжатие, а минимальная прочность наблюдается при степени восстановления 20-40% [4]. Показано, что показатель пластичности при индентировании фазы титаномагнетита (магнетита) в неофлюсованных обожженных окатышах выше, чем у титаногематита (гематита), свидетельствуя о большей склонности последнего к созданию внутренних напряжений, приводящих к образованию микротрещин [5]. Послойная укладка окатышей перед их обжигом, когда более крупные располагаются наверху, даёт повышение прочности на сжатие до 15-20% [6]. Разрушение обожженных окатышей под действием внешних механических сил происходит в зависимости

от морфологии фаз – при высоком содержании железорудных компонентов (97% и более) – по железосодержащим минералам; при низком содержании (менее 95%) – по силикатной связке [7]. Использование бенто-полимерных связующих повышает вязкость водной суспензии на стадии окомкования и уменьшает число трещин в обожженных окатышах [8]. При малой длительности обжига железорудных окатышей уровень температуры процесса на формирование прочностных свойств является преобладающим, с увеличением времени нахождения окатыша в зоне максимальных температур значимость температурного фактора снижается [9]. Представлены результаты физического моделирования шлаковых связей, которые могут образовываться в процессе обжига окатышей с использованием известняка или доломита в качестве флюсов [10]. Показана повышенная роль касательных напряжений при подготовке железорудного сырья, включающего обожженные окатыши, к металлургическому процессу [11]. Изучена прочность окатышей, полученных с использованием в качестве сырья железистых кварцитов Михайловского ГОКа, красного шлама, обожженного нефтяного кокса [12]. Окатыши, окомкованные с использованием сапонита в качестве связующего, имели после обжига прочность на сжатие, в 2,83 раза превышающую показатель образцов с бентонитом [13].

Разработана методика расчета теплообмена в слое обжигаемых офлюсованных окатышей применительно к конвейерной машине, позволяющая определять температуры материала и газа в слое, что достигается использованием граничных условий и путем интегрирования дифференциальных уравнений, опи-

сывающих теплообмен [14]. Установлено, что окатыши, полученные с частичной диссоциацией гематита, по сравнению с окатышами, полученными по технологии интенсивного нагрева, имеют более высокие показатели механической прочности, истираемости и прочности при восстановлении [15]. Математическим моделированием оценено влияние на температуру газа в периферийной, осевой зонах колошника доменной печи и рудном гребне изменения параметров, характеризующих режимы загрузки материалов, включающих окатыши, и дутья в интервале эквивалентной крупности кокса 50,0-57,5 мм [15].

На доменной печи уральского металлургического предприятия, оснащенной лотковым загрузочным устройством, реализовали преимущество железорудного сырья, включающего железорудные окатыши, эквивалентной крупностью 11,7 мм по сравнению с 11,4 мм, для чего корректировкой режима загрузки сырья уменьшили его содержание в шихте, поступающей со станций угловых положений лотка № 9-11, в среднем от 100 до 96,4% с увеличением его доли на станциях № 6-8 от 43,7 до 45,4% [17].

Для повышения положительного действия крупности кокса на ход доменной плавки рассмотрены рациональные режимы загрузки шихтовых материалов по кольцевым зонам колошника с корректировкой параметров дутья [18]. Предложено усовершенствовать тепловую схему обжиговой машины ОК-306 Лебединского ГОКа, включая забор части нагнетаемого подогретого воздуха горения дымососами и направление в начало зоны охлаждения [19]. Предложены пути решения проблем в области технологии упрочняющего обжига железорудных окатышей на обжиговой машине конвейерного типа [20]. Рассмотрена модификация технологии «дуплекс-процесс Ромелт» для плавки высокоокисленного железосодержащего материала и проведены расчеты показателей плавки [21, 22]. Представлены инструменты для совершенствования режимов производства окатышей с использованием автоматизированных систем управления технологическими процессами на промышленном предприятии [23]. Выявлена роль однородности по крупности материалов для предупреждения образования тугоплавкого «Промежуточного слоя» в печах Ванюкова [24] и настывы в печах взвешенной плавки [25].

Представленные исследования указывают на целесообразность их продолжения рассмотрением действия на ход металлургического процесса использования окатышей, произведенных из железистых кварцитов, взамен концентратов скарного типа.

Условия

Исследовали два периода работы доменной печи объемом 1370 м³ длительностью 31 и 30 номинальных суток. В первом периоде использовали окатыши, произведенные в Соколовско-Сарбайском горнопромышленном объединении (ССГПО) из магнетитового кон-

центрата, во втором – произведенные в Михайловском ГОКе из железосиликатного концентрата. Их применяли в доменной плавке совместно с агломератом, спечённым с преимущественным использованием концентрата ССГПО. Доля окатышей в железорудной части шихты первого периода составила 34,35, второго – 32,39% (табл. 1).

Таблица 1

Параметры загрузки доменной печи

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Расход, кг/т чугуна:		
кокса (сухого, скипового)	408,6	408,6
агломерата: фабрики №2	23	5
фабрики №3	795	791
фабрики №5	178	22
неочищенного	96	52
складированного	182	221
окатышей: Михайловский ГОК	116	420
ССГПО	202	0
Лебединский ГОК	25	98
металлодобавок	35	41
марганцевой руды	19,4	27,1
кварцита	0,5	0
фракции кокса 25-40 мм	0	1,9
Отсев мелочи перед загрузкой		
в скипы, кг/т чугуна:		
агломерата	24,5	27,3
кокса	16,3	18,7
Количество перешихтовок	38	24

Выплавленный чугун имел состав, представленный в табл. 2, а шлак – в соответствии с табл. 3. Комплекс обновлённых условий привёл к следующему изменению состава чугуна (+ увеличение, – уменьшение), отн. %:

Si	-9,9
Mn	+29,4
S	+11,1
Ti	+24,4
P	+5,6
Cr	+42,9
C	+0,3

Таблица 2

Содержание компонентов в чугуне

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Содержание в чугуне, %:		
Si	0,684	0,616
Mn	0,337	0,436
S	0,018	0,020
Ti	0,041	0,051
P	0,054	0,057
Cr	0,028	0,040
C	4,770	4,783

Таблица 3

Содержание компонентов в шлаке и основность

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Содержание в шлаке, %:		
SiO ₂	39,66	40,47
Al ₂ O ₃	10,34	9,09
CaO	38,52	38,51
MgO	8,73	9,51
MnO	0,43	0,56
FeO	0,26	0,27
S	0,61	0,60
TiO ₂	0,65	0,93
Na ₂ O	0,680	0,543
K ₂ O	0,797	0,736
Основность шлака:		
CaO/SiO ₂	0,971	0,951
(CaO+ MgO)/SiO ₂	1,191	1,186
(CaO+MgO)/(SiO ₂ +Al ₂ O ₃)	0,945	0,969

Результаты исследования

Показатели хода восстановления, обеспечившего формирование химического состава чугуна, шлака, доменного газа, представлены в табл. 4. Степень эндотермического прямого восстановления по Павлову (углеродом из FeO до Fe) уменьшилось на 1,7 абс.% при снижении степени восстановления газом CO на 0,7 абс.% за счёт роста степени восстановления водородом на 2,4 абс.%.

Таблица 4

Показатели хода восстановления по периодам

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Степень восстановления Fe из FeO различными восстановителями, %:		
углеродом	26,5	24,8
монооксидом углерода	33,3	32,6
водородом	41,2	42,6
Степень использования газа-восстановителя, %:		
CO	42,7	42,4
H ₂	46,5	46,4
Соотношение степеней использования H ₂ и CO	1,09	1,10

При этом использование CO на восстановление ухудшилось на 0,3 абс.%, а водорода – на 0,1 абс.% в условиях роста степени восстановления Fe из FeO газами на 1,7 абс.%, обеспеченного увеличением расхода топлива-восстановителя на 4,84 кг/т чугуна. Эти изменения свидетельствуют о смещении части процессов восстановления из нижней ступени интенсивного теплообмена в область повышенных температур зоны замедленного теплообмена. Такое смещение уменьшало потребление мелочи кокса на восстановление, что действовало в направлении увеличения поступления её в горн, повышая гетерогенность и, соответственно, совокупную вязкость расплава.

Переход на окатыши Михайловского ГОКа сопровождался понижением общего перепада давления газов по высоте на 1,80%, степени уравнивания шихты подъёмной силой газового потока на 1,92 отн. % (табл. 5). Основными причинами невозможности ведения процесса при прежнем уровне этих параметров являлись рост вязкости гетерогенного расплава и неравномерное увеличение подъёмной силы движущихся от горна к колошнику печных газов (см. табл. 5).

Таблица 5

Показатели взаимного сопротивления движению потоков шихты и газа

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Общий перепад давления газа, кПа	111	109
Степень уравнивания материалов подъёмной силой газового потока, %	41,7	40,9
Скорость газа на пустое сечение печи в рабочих условиях по температуре и давлению, м/с:		
у поверхности шихты	1,61	1,68
в распаре	1,54	1,56
в нижней части заплечиков	2,69	2,74
Динамический напор газа на пустое сечение печи в рабочих условиях по температуре и давлению, Н/м ² :		
у поверхности шихты	2,40	2,51
в распаре	0,93	0,95
в нижней части заплечиков	1,65	1,70

Рост их динамического напора составил: у поверхности столба шихты – 2,58, в распаре – 2,15, в нижней части заплечиков – 3,03%.

Перераспределение процессов в объёме печи привело к увеличению проплава сырья на 2,82% согласно табл. 6.

Таблица 6

Показатели интенсивности движения потоков

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Производство чугуна и шлака на 1 м ³ объёма печи, т/сут	4,173	4,296
Интенсивность по топливу (сырому коксу+природному газу), кг/(м ³ ·сут)	1545	1566
Интенсивность по сырью, кг/(м ³ ·сут)	4960	5100
Интенсивность по дутью (расчётному), м ³ /(м ³ ·мин)	2,107	2,126
Интенсивность по газу, м ³ /(м ³ ·мин):		
колошниковому	3,718	3,767
фурменному	3,428	3,488
в распаре	3,524	3,583
в шахте	3,621	3,674

Оно сопровождалось ростом показателей интенсивности, %:

- по дутью.....0,90;
- по топливу.....1,36;
- по колошниковому газу.....1,32.

Горн печи заполнялся продуктами плавки согласно табл. 7 в условиях роста расчётной вязкости гетерогенного шлака от 0,615 до 0,690 Па·с.

Таблица 7

Показатели интенсивности накопления продуктов плавки в горне

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Интенсивность накопления продуктов плавки в горне, м ³ /мин	1,010	1,063
Степень заполнения продуктами плавки межкусковых пустот кокса, %	94,1	98,4
Интенсивность орошения кокса продуктами плавки, т/т	3,483	3,540

Величина изменения этих показателей составила:

- интенсивность накопления продуктов плавки в горне увеличилась на 5,25%;
- степень заполнения продуктами плавки межкусковых пустот кокса увеличилась на 4,57 отн.%;
- интенсивность орошения кокса продуктами плавки возросла на 1,64%.

Наряду с параметрами, представленными выше, на это влияло качество кокса, прочностные свойства и реакционную способность которого характеризуют табл. 8 и 9.

Таблица 8

Показатели прочности и реакционной способности кокса, %

Период	M25	M10	CSR	CRI
I	89,61	7,62	48,70	33,90
II	89,62	7,61	44,10	35,80

Уменьшение горячей прочности кокса CSR на 9,44% повышало образование мелкой фракции в высокотемпературной зоне печи.

Таблица 9

Ситовый состав кокса по периодам и классам крупности

Период	Класс крупности, мм				
	+80	60-80	40-60	25-40	-25
I	13,70	38,70	39,80	6,10	1,70
II	15,60	40,10	36,60	6,10	1,70

Эквивалентная по поверхности крупность кокса увеличилась от 61,82 до 64,03 мм (3,57%), средневзвешенная – от 63,31 до 64,65 мм (2,12%). Оценили однородность кокса по соотношению эквивалентной ($f_{\text{экв}}$) и средневзвешенной ($f_{\text{срв}}$) крупности, считая, что $f_{\text{экв}} > f_{\text{срв}}$ свидетельствует о большей значимости действия крупности на тепло и массообмен внутри кусков, а $f_{\text{экв}} < f_{\text{срв}}$ – на газо- и гидродинамику между кусками кокса. В периоде II по сравнению с периодом I отношение $f_{\text{экв}}/f_{\text{срв}}$ увеличилось от 0,98 до 0,99, при-

ближаясь к рациональной величине 1,0.

Горение топлива по количеству образовавшегося газа, его составу и температуре соответствовало табл. 10, а по характеристикам движения газовой смеси – табл. 11.

Таблица 10

Показатели горения топлива в печи по периодам

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Длительность движения кокса от уровня засыпи до зоны горения, час	3,39	3,37
Интенсивность горения кокса, кг/мин	787	800
Выход фурменного газа, м ³ /т чугуна	1673	1691
Состав фурменного газа, %:		
CO	36,6	36,8
H ₂	20,1	20,7
N ₂	43,3	42,5
Теоретическая температура горения, °C	1992	1975

Таблица 11

Показатели движения газовой смеси в фурмах

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Масса газовой смеси на одну фурму, кг/с	0,373	0,377
Скорость газовой смеси на выходе из фурм, м/с:		
в нормальных условиях	209	211
в рабочих условиях	313	316
Кинетическая энергия газовой смеси, кДж/с	179	185
Протяженность рыхлой части фурменного очага, мм	1087	1094

Длительность движения кокса от уровня засыпи до зоны горения уменьшилась на 0,59%, с повышенной прочностью окатышей из железосиликатного концентрата. Интенсивность горения кокса увеличилась на 0,34% в соответствии с ростом потребности в нём для повышения производительности. Выход фурменного газа на единицу массы чугуна возрос на 1,08%, а содержание восстановителей в нём увеличилось на 1,85 отн.%. Рост концентрации водорода на 2,99%, его количества на 3,56%, поступления CO из фурменной зоны на 1,63% и снижение температуры, развиваемой в фурменных очагах (на 0,85% по табл. 10), обеспечили уменьшение степени развития эндотермической реакции прямого восстановления железа из оксидов.

Рост концентрации водорода на 2,99%, его количества на 3,56%, поступления CO из фурменной зоны на 1,63% и снижение температуры, развиваемой в фурменных очагах (на 0,85% по табл. 10), обеспечили уменьшение степени развития эндотермической реакции прямого восстановления железа из оксидов.

Протяжённость рыхлой части фурменных очагов в пределах 1087-1094 мм (см. табл. 11) обеспечивала беспрепятственный сход кокса, поступившего к их границам, в зону развития реакций горения вследствие действия механизма саморегулирования их размеров. Параметры движения газовой смеси в фурмах способствовали повышению доли периферийной части зоны потока материалов, движущихся от колошника к горну, по сравнению с центральной

частью [26]. Кроме этого, на перераспределение зоны потока действовало увеличение крупности кокса [18].

Теплообмен по высоте печи происходил согласно табл. 12. Переход от периода I к II сопровождался увеличением расхода тепла на проведение процессов в определяющей зоне на 0,72% (табл. 12) преимущественно вследствие увеличения выноса его в верхнюю ступень теплообмена на 1,15%. Рост по этой причине экстремума градиента потерь напора газов вверх шахты вынуждал снизить степень уравнивания шихты подъёмной силой газового потока (согласно табл. 5), затрудняя улучшение работы печи по расходу кокса и производительности.

Таблица 12

Показатели тепловой работы печи по периодам

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Соотношение теплоёмкостей потоков шихты и газа:		
- в нижней части печи (с температурой более 850 °С)	1,766	1,752
- в верхней части печи (с температурой менее 850 °С)	0,795	0,777
Суммарный расход тепла на проведение всех процессов в определяющей зоне, мДж/т чугуна	2795	2815
Перенос тепла газами из определяющей расход кокса зоны по высоте печи в верхнюю ступень теплообмена, %	26,0	26,3

Поступление серы в чугун и её распределение соответствовало табл. 13.

Таблица 13

Показатели распределения серы между чугуном и шлаком

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Содержание серы в чугуне, %	0,018	0,020
Поступало серы в доменную печь, кг/т чугуна	3,14	3,10
Основность шлака по $(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)$	0,95	0,97
Коэффициент распределения серы между чугуном и шлаком после их выпуска и разделения	33,9	30,0
Основность шлака по $(CaO+\alpha MgO)/(SiO_2+\beta Al_2O_3)$	1,18	1,18
Равновесный коэффициент распределения серы между чугуном и шлаком в условиях горна	33,7	32,9
Расчётная вязкость гетерогенного шлака, действующая на коэффициент распределения серы, Н·с/м ²	0,615	0,690

В условиях работы с повышенным расходом окатышей Михайловского ГОКа выплавлялся чугун с более высоким содержанием серы на 11,1 отн.%. Основными действовавшими на это факторами были ухудшение условий перехода серы в компоненты шлака при движении материалов от середины шахты до горна и рост вяз-

кости гетерогенного шлака на 12,2%, предупреждение которого возможно снижением нестабильности теплового состояния печи и промывкой горна [27].

Результатом изложенных особенностей хода процессов являются показатели, приведенные в табл. 14.

Таблица 14

Удельный расход кокса, топлива-восстановителя и производительность

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна	408,6	408,6
Суммарный расход кокса (скипового и фракции 25-40 мм в составе железорудного сырья), кг/т чугуна	408,6	410,2
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	159,0	163,4
Расход всего топлива-восстановителя, кг/т чугуна	525,94	530,78
Удельная производительность, т/(м ³ ·сут)	2,950	2,970

Таким образом, на рассмотренной доменной печи объемом 1370 м³ осуществили замену окатышей, произведенных в ССППО из магнетитового концентрата, на произведенные в Михайловском ГОКе из железосиликатного концентрата, без изменения расхода скипового кокса, увеличив производительность печи на 0,68%, потребление суммарного кокса на 1,6 кг/т, всего топлива-восстановителя на 4,84 кг/т чугуна – долю окатышей Михайловского ГОК повысили с 7,02 до 25,45%, исключив окатыши ССППО от 12,23%. Их проплавляли совместно с агломератом, спечённым с преимущественным использованием концентрата ССППО.

Заключение

На доменной печи объемом 1370 м³ заменили окатыши, произведенных в ССППО из магнетитового концентрата, на произведенные в Михайловском ГОКе из железосиликатного концентрата, без изменения удельного расхода скипового кокса, увеличив производительность печи на 0,68%, потребление суммарного кокса на 1,6 кг/т, всего топлива-восстановителя на 4,84 кг/т чугуна – долю окатышей Михайловского ГОК повысили с 7,02 до 25,45%, исключив окатыши ССППО от 12,23%. Их проплавляли совместно с агломератом, спечённым с преимущественным использованием концентрата ССППО.

Выявили следующие основные изменения хода процессов:

- развитие прямого восстановления Fe из FeO снизилось на 1,7 абс. %;
- степень восстановления водородом увеличилась на 2,4 абс. %;
- средняя степень уравнивания материалов подъёмной силой газового потока от горизонта фурм до поверхности шихты снизилась на 1,92 отн. %;

– рост динамического напора поднимающихся от горна к колошнику печных газов, приведенного к пустому сечению в рабочих условиях по температуре и давлению, составил: у поверхности слоя шихты – 2,58, в нижней части заплечиков – 3,03%;

– длительность движения кокса до зоны горения уменьшилась на 0,59%;

– кинетическая энергия истечения дутья из фурм увеличилась на 3,35%;

– протяженность рыхлой части фурменного очага к осевой части горна возросла на 0,64%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министрства науки высшего образования России (проект FZRU-2026-0003).

Список источников

1. Григорович К.В. Современное сталеплавильное производство: тенденции и вызовы // Международная научная конференция имени академика А.М. Самарина. М.: Интерконтакт Наука, 2025. С. 31-45.
2. Малышева Т.Я., Долинская О.А. Петрография и минералогия железорудного сырья. М.: «МИСиС», 2004. 424 с.
3. Исследование взаимодействия восстановительных газов с окатышами методом клеточных автоматов / Берсенов И.С., Сабиров Э.Р., Плаксин И.Д., Спирин Н.А. // Кокс и химия. 2026. № 1. С. 16-24.
4. Особенности разрушения окатышей при восстановительно-тепловой обработке / Берсенов И.С., Брагин В.В., Чесноков Ю.А., Груздев А.И., Сабиров Э.Р., Спирин Н.А. // Металлург. 2025. № 3. С. 49-54.
5. Микромеханические свойства структурно-фазовых составляющих неофлюсованных обожженных титаномагнетитовых окатышей / Дмитриев А.Н., Смирнова В.Г., Витькина Г.Ю., Вязникова Е.А., Роговая С.А. // Металлург. 2025. № 9. С. 21-26.
6. Повышение качества железорудных окатышей за счёт управления их сегрегацией по высоте слоя / Бардавелидзе Г.Г., Груздев А.И., Пигарев С.П., Берсенов И.С., Спирин Н.А. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2025. № 2. С. 15-21.
7. Влияние морфологии железорудных фаз в окатышах на характер их разрушения / Брагин В.В., Берсенов И.С., Берсенов Е.С., Сивков О.Г., Загайнов С.А. // Сталь. 2025. № 1. С. 2-9.
8. Берсенов И.С., Усольцев Д.Ю., Солодухин А.А. / Генезис трещин в железорудных окатышах и оценка путей повышения их прочности // Сталь. 2025. № 10. С. 2-8.
9. Влияние температуры и времени на процесс спекания в железорудных окатышах / Никитченко Т.В., Тимофеева А.С., Шокова С.Б., Степанова И.С. // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Старый Оскол: МИСиС, 2023. С. 95-100.
10. Исследование шлаковых связей, образующихся при обжиге железорудных окатышей / Никитченко Т.В., Тимофеева А.С., Федина В.В., Шокова С.Б., Степанова И.С. // Металлург. 2024. № 9. С. 17-20.
11. Повышение эффективности подготовки сырья для металлургических переделов / Никитин А.Г., Баженов И.А., Курочкин Н.М. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2024. Т. 67. № 5. С. 612-615.
12. Поиск оптимальных условий окомкования железистых кварцитов с использованием добавок из красного шлама и обожженного кокса / Лебедев А.Б., Сизяков В.М., Шариков Ф.Ю. // Обогащение руд. 2024. № 5. С. 44-51.
13. Сравнение степени влияния сапонита и бентонита на прочность при сжатии железорудных окатышей / Сластников М.А., Лебедев А.Б. // Prospects and Key tendencies of science in contemporary world. Proceedings of LIV International Multidisciplinary Conference. Madrid, Spain, 2025. С. 154-157.
14. Юрьев Б.П., Дудко В.А. Разработка метода расчёта теплообмена применительно к обжигу железорудных окатышей на конвейерной машине // Металлы. 2024. № 2. С. 11-17.
15. Юрьев Б.П., Дудко В.А. Анализ влияния режимов обжига на металлургические свойства железорудных окатышей // Сталь. 2024. № 7. С. 9-15.
16. Математическое моделирование влияния эквивалентной крупности кокса на изменение температурного режима по радиальным зонам доменной печи для различных параметров загрузки и дутья / Харченко А.С., Павлов А.В., Юдина С.В., Сibaгатуллин С.К., Свечникова Н.Ю., Юдин Д.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. № 2. С. 41-49.
17. Корректировка режима загрузки сырья в доменную печь при увеличении его эквивалентной крупности / Харченко А.С., Сibaгатуллин С.К., Харченко Е.О., Бегинюк В.А. // Черные металлы. 2024. № 3. С. 22-27.
18. Влияние эквивалентной крупности кокса на показатели работы доменной печи, оснащённой лотковым загрузочным устройством в условиях ПАО «ММК» / Харченко А.С., Юдина С.В., Сibaгатуллин С.К., Свечникова Н.Ю., Юдин Д.В., Кургузов К.В., Павлов А.В. // Теория и технология металлургического производства. 2024. № 4 (51). С. 4-8.
19. Модернизация обжиговых машин второго поколения ОК-306 / Селезнев В.С., Шатохин Е.М., Киренков А.Н., Чукин Д.М., Катаев А.П., Котышев В.Е., Буткарев А.А. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2025. 468 с.

20. Мальцева В.Е., Селезнев В.С., Чукин Д.М. Термообработка сырых окатышей и схемы обжиговых машин. М.: Металлургиздат, 2023. 720 с.
21. Тараненко М.Е., Мальцева В.Е. Окискование и металлургия. Существующие подходы автоматизации технологических процессов на производстве. Курск: ЗАО «Университетская наука», 2024. 215 с.
22. Переработка гематитовой руды дуплекс-процессом Ромелт / Валавин В.С., Похвиснев Ю.В., Макеев С.А., Зайцев А.К. // Металлург. 2023. № 7. С. 12-18.
23. Processing of hematite ore by Romelt duplex process / Valavin V.S., Pokhvisnev Y.V., Makeev S.A., Zaytsev A.K. // Metallurgist. 2023. T. 67. № 7-8. С. 899-907.
24. Изучение свойств атипичного продукта «Промежуточного слоя» печей Ванюкова при переработке шихты с высоким содержанием техногенных апрудуктов / Крупнов Л.В., Пахомов Р.А., Каверзин А.В., Косов Я.И., Малахов П.В. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2025. Т. 31. № 2. С. 5-18.
25. Оптимизация конструкции распылителя шихты печей взвешенной плавки с использованием методов математического моделирования / Крупнов Л.В., Севагин С.В., Фомичев А.С., Ярцев К.К., Миличенко В.П., Малахов П.В. // Металлург. 2025. № 7. С. 93-102.
26. Сибегатуллин С.К., Харченко А.С., Макарова И.В. Теория, технология и автоматизация доменного процесса. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. 142 с.
27. Результаты физического моделирования загрузки лотковым устройством марганцевой руды в качестве добавки к железорудному сырью / Харченко А.С., Закуцкая Л.А., Потапова М.В., Сибегатуллин С.К. // Черные металлы. 2023. № 5. С. 4-7.

Сведения об авторах

Харченко Александр Сергеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: as.mgtu@mail.ru ORCID 0000-0002-0454-6399

Павлов Александр Владимирович – кандидат технических наук, начальник доменного цеха, Магнитогорский металлургический комбинат, Магнитогорск, Россия. Email: pavlov.av@mmk.ru

Сибегатуллин Салават Камилевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: 10tks@mail.ru ORCID 0009-0004-0220-0126

Харченко Елена Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: eo.mgtu@mail.ru

Сысоев Виктор Иванович – кандидат технических наук, ассистент кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: : viktor.sysoev.86@yandex.ru

Магасумов Газиз Загирович – аспирант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Вакуленко Андрей Игоревич – аспирант, ФГБОУ ВО «ЗГУ им. Н.М. Федоровского», Норильск, Россия. E-mail: vakulenkoaiwork@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EFFECT ON THE COURSE OF THE BLAST FURNACE PROCESS OF PELLETS PRODUCED FROM FERROUS QUARTZITES INSTEAD OF SKARN-TYPE CONCENTRATES, AT A NOMINAL SHARE IN THE CHARGE

Aleksandr S. Kharchenko – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Metallurgy and Chemical Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: as.mgtu@mail.ru. ORCID 0000-0002-0454-6399

Aleksandr V. Pavlov – PhD in Engineering, Head of the Blast Furnace Shop, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia. Email: pavlov.av@mmk.ru

Salavat K. Sibagatullin – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor in the Department of Metallurgy and Chemical Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: 10tks@mail.ru. ORCID 0009-0004-0220-0126

Elena O. Kharchenko – PhD in Engineering Sciences, Associate Professor in the Department of Metallurgy and Chemical Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: eo.mgtu@mail.ru

Viktor I. Sysoev – PhD (Engineering), Assistant Professor, Department of Metallurgy and Chemical Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: viktor.sysoev.86@yandex.ru

Gaziz Z. Magasumov – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Andrey I. Vakulenko – postgraduate student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Fedorovsky Polar State University», Norilsk, Russia.

Abstracts. Two periods of operation of a 1,370 m³ blast furnace, lasting 31 and 30 nominal days, were studied. The first period was characterized by the predominant use of pellets produced at the Sokolovsko-Sarbay Mining and Production Association from skarn concentrate, while the second period utilized pellets produced at the Mikhailovsky Mining and Processing Plant from ferruginous quartzites. Calculated indicators were used to assess the impact of this on various aspects of blast furnace processes. In particular, the following was revealed: the development of direct reduction of Fe from FeO decreased by 1.7% abs; the degree of hydrogen reduction increased by 2.4% abs; the average degree of equilibration of materials by the lifting force of the gas flow from the tuyeres horizon to the charge surface decreased by 1.92% rel; the increase in the dynamic pressure of the gases rising from the hearth to the furnace top, reduced to the empty cross-section under operating conditions in temperature and pressure, was: 2.58% at the charge layer surface, 3.03% at the bottom of the shoulders; the duration of coke movement to the combustion zone decreased by 0.59%; the kinetic energy of blast outflow from the tuyeres increased by 3.35%; the length of the loose part of the tuyere hearth to the axial part of the furnace increased by 0.64%.

In the blast furnace under consideration, with an increase in the proportion of pellets from iron silicate concentrate from 7.02 to 25.45%, the exclusion of pellets from magnetite concentrate from 12.23%, without changing the specific consumption of skip coke, the furnace productivity was increased by 0.68%, the consumption of total coke by 1.6 kg/t, and the total reducing fuel by 4.84 kg/t of pig iron.

Keywords: metallurgical process, pig iron, coke, pellets, magnetite, concentrate, ferruginous quartzite, reduction, heat transfer, gas movement, movement of materials to the furnace.

Ссылка на статью:

Действие на ход доменного процесса окатышей, произведенных из железистых кварцитов взамен концентратам скарного типа, при номинальной доле в шихте / Харченко А.С., Павлов А.В., Сибгатуллин С.К., Харченко Е.О., Сысоев В.И., Магасумов Г.З., Вакуленко А.И. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №2(57). С. 16-23. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-16-23](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-16-23)
 Kharchenko A.S., Pavlov A.V., Sibgatullin S.K., Kharchenko E.O., Sysoev V.I., Magasumov G.Z., Vakulenko A.I. Effect on the course of the blast furnace process of pellets produced from ferrous quartzites instead of skarn-type concentrates, at a nominal share in the charge. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 57, no. 2, pp. 16-23. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-16-23](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-16-23)