

УДК 622.788.32:669.162.262.3

И.Ф.Курунов, В.Н.Титов, Т.Я.Мальшева, О.Г.Большакова

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БРИКЕТОВ НА ЦЕМЕНТНОЙ СВЯЗКЕ ИЗ ТЕХНОГЕННОГО И ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ДОМЕННОЙ ПЛАВКЕ

*ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»
Московский государственный институт стали и сплавов*

На основе компьютерное моделирование показаны энергетические и экологические преимущества доменной плавки с использованием брикетов из техногенных материалов и металлizedованного сырья. Приведены балансы энергозатрат на рециклинг техногенных материалов по альтернативным технологиям.

В настоящее время рециклинг большинства видов дисперсных металлургических отходов осуществляется путем их использования в составе агломерационной шихты. Однако, по технологическим причинам применение некоторых из них ограничено или невозможно. Кроме того, на не имеющих усреднительного склада аглофабриках применение техногенного сырья разного состава без возможности его контролируемого дозирования негативно отражается на стабильности состава и качестве агломерата.

В части рециклинга железосодержащих дисперсных отходов альтернативой агломерации может быть процесс брикетирования вибропрессованием, являющийся более универсальным и менее энергозатратным способом окускования и находящий все более широкое применение для подготовки техногенного сырья для доменной плавки как на металлургических заводах, не имеющих аглопроизводства, так и на заводах с аглофабриками [1–7]. Эта технологии производства брикетов на цементной связке, ранее не применяемых в доменных печах, может использоваться и в отношении природных железорудных материалов. В настоящем докладе обобщены результаты лабораторных исследований поведения брикетов из различных оксидных железосодержащих материалов при их нагреве в восстановительной атмосфере и результаты промышленных экспериментов по проплавке их в доменных печах.

Поведение брикетов их оксидных железосодержащих материалов при нагреве в восстановительной атмосфере

Холодная прочность брикетов на цементной связке обеспечивается исключительно прочностью цементного камня, образующегося при затвердевании цементного теста, равномерно распределенного между частицами железосодержащего материала. Преобладающими составляющими цементного камня являются твердые растворы трех- и двухкальциевых гидросиликатов кальция, которые образуются при смачивании портландцемента водой [8,9].

Проведенные по стандартной методике испытания лабораторных и промышленных брикетов из различных техногенных материалов и железорудного концентрата показали, что уже при содержании 8–10% цемента обеспечивается их достаточная прочность на раздавливание (более 30 кг/см²), при которой в результате сколов острых кромок брикетов во время транспортировки и перегрузок образуется не более 5–7% фракции 0–10 мм. Максимальные значения прочности имели брикеты из окалины, минимальную – брикеты из конвертерного шлама. Достаточная прочность таких брикетов достигается при их изготовлении с содержанием цемента 15%.

Поведение при нагреве в восстановительной атмосфере изучали на лабораторных брикетах (размером 70x70x70 мм) из прокатной окалины (№1), магнетитового концентрата (№2), конвертерного шлама (№3) и кварцевого песка (№4), содержащих соответственно 6,6, 8,8, 9,0 и 10,7% цемента (табл. 1). Брикеты были подвергнуты нагреву до T=1150⁰C со скоростью 500⁰C/час в токе водорода с последующим охлаждением до комнатной температуры азотом. Все испытанные брикеты сохранили свою целостность и форму. Фазовый состав брикетов после термообработки изучали на шлифах, изготовленных из поверхностных, промежуточных и срединных частей брикетов.

Таблица 1. Химический состав брикетов и портландцемента

	Fe _{общ}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	C	S	Основ- ность
Брикет №1	66,79	60,62	31,31	2,14	0,59	4,38	0,35	0,05	0,05	2,05
Брикет №2	60,60	25,56	58,16	7,58	0,75	5,84	0,68	0	0,08	0,77
Брикет № 3	54,24	60,88	9,84	3,58	0,74	17,56	0,84	2,00	0,05	4,91
Брикет № 4	0,13	0	0,19	91,50	0,70	6,82	0,40	0	0,06	0,075
Цемент	1,26	0	1,8	20,6	6,5	63,7	3,7	0	0,6	3,09

Брикеты из окалины, железорудного концентрата и конвертерного шлама после восстановления упрочнились, благодаря формированию новой плотной микроструктуры из вюстита и железистых силикатов, образовавшихся в результате реакций восстановления оксидов железа и твердофазных реакций между вюститом, оксидами пустой породы железосодержащих компонентов брикетов и оксидами цементного камня. Кроме того, поверхностный слой этих брикетов превратился в своеобразный металлический кожух из железа, толщина которого (от 3–5 до 10–15 мм) определялась крупностью частиц и восстановимостью железосодержащего материала и исходной (после изготовления) плотностью брикета. В условиях доменной печи плотная структура из железистых оливинов и вюстита и поверхностный металлический каркас могут обеспечивать сохранение целостности и прочности таких брикетов вплоть до их размягчения и плавления в зоне когезии.

В результате термообработки брикет из кварцевого песка потерял прочность и разрушился при незначительном механическом воздействии. Потеря его прочности обусловлена, видимо, разрушением кристаллических решеток гидросиликатов цементного камня с образованием активных свободных оксидов кальция и кремния.

В брикете из железорудного концентрата магнетит полностью восстановился до вюстита, часть которого прореагировала с оксидами кремния и кальция с образованием железистых оливинов. Толщина металлизированного поверхностного слоя составила 3–5 мм. (рис.1). На расстоянии до 20–25 мм от поверхности брикета появились небольшие зоны металлического железа по границам вюститных зерен. Плотная структура железосиликатной фазы между зернами вюстита в срединной части брикета (рис.2) свидетельствует о том, что она прошла через жидкое, либо вязко–пластичное состояние. В таком брикете восстановление основной части железа (более 80%) в доменной печи будет происходить только твердым углеродом после расплавления брикета.

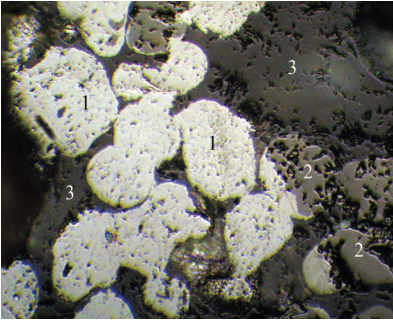


Рис.1. Микроструктура поверхностного слоя брикета из магнетитового концентрата : зерна металла (1), вюстита (2), оливиновая фаза (3) (отраженный свет, увеличение x500)

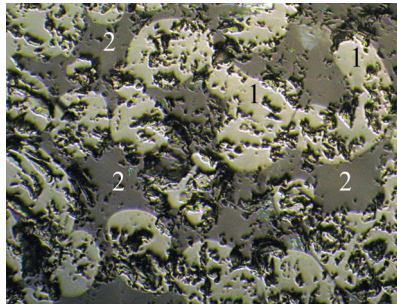


Рис.2. Микроструктура центральной части брикета из магнетитового концентрата : вюстит (1), оливиновый фаза (2)

В брикете из окалины толщина поверхностного металлического слоя достигала 10–15 мм (Рис.3). Железосодержащая фаза центральной зоны представлена в основном зернами вюстита, местами оконтуренными металлическим железом (рис.4). Низкое содержание SiO_2 и небольшая удельная поверхность контакта между частицами окалины (размер 0,1–5,0 мм) и продуктами дегидратации цементного камня (CaO , SiO_2) обусловили образование лишь незначительного количества силикатов оливинового состава в микроструктуре брикета. Крупные частицы окалины и ограниченное количество образовавшихся трудновосстановимых железокальциевых оливинов способствовали увеличению толщины поверхностной зоны металлического железа.

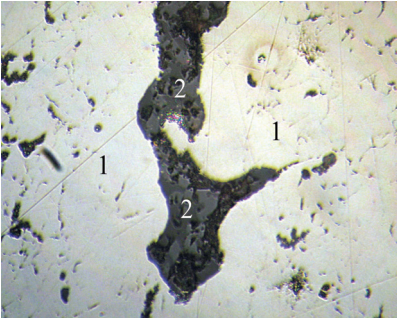
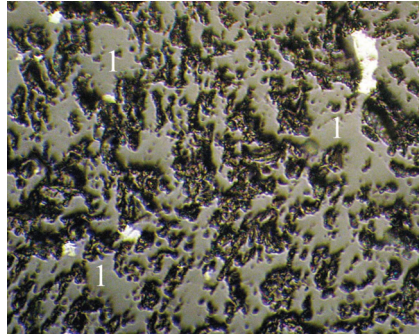


Рис.3. Микроструктуры поверхностного слоя брикета из окалины: металлическое железо (1), оливиновая фаза (2) (отраженный свет, увеличение x 1000)

Рис.4. Микроструктуры центральной части брикета из окалины: вюстит (1). (отраженный свет, увеличение x 200)



В поверхностном слое (6–8 мм) брикета из конвертерного шлама кроме металлического железа присутствует также незначительное количество оливиновой фазы и зерен алита. Вплоть до центра брикета его структура представлена преимущественно зернами вюstitа, оконтуренными металлическим железом, а также алитом и оливинами. Появление металлического железа в центральной зоне брикета (рис.5) вызвано слоя восстановлением его углеродом, который в небольшом количестве (2–3%) имеется в конвертерном шламе.

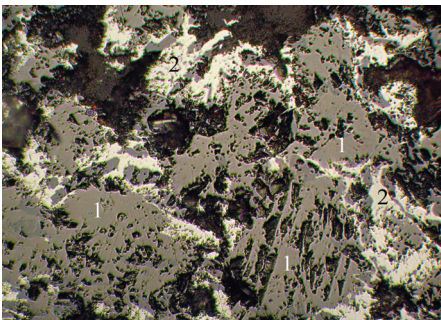


Рис.5. Микроструктура срединной части брикета (10–20 мм от поверхности) из конвертерного шлама: вюститная фаза (1), металл (2) (отраженный свет, увеличение x500)

В брикете из кварцевого песка обнаружены лишь незначительные следы взаимодействия между частицами кварца и компонентами цементного камня, не оказавшие влияния на упрочнение брикета во время его нагрева. В результате термообработки брикет потерял прочность и разрушился при незначительном механическом воздействии. Потеря его проч-

ности обусловлена, видимо, разрушением кристаллических решеток гидросиликатов цементного камня при температуре 700–750°C с образованием активных свободных оксидов кальция и кремния.

Металлургические свойства промывочного агломерата и брикетов из окалины.

Периодическое производство на аглофабрике промывочного агломерата сопровождается неизбежным повышением колеблемости состава обычного агломерата во время переходных периодов, что негативно сказывается на работе доменных печей. Metallургические свойства брикетов из окалины, как возможного альтернативного промывочного материала для доменных печей, оценивали в сопоставлении со свойствами промышленного промывочного агломерата. Испытания этих материалов проведены в лабораториях: МИСиС – восстановимость и размягчаемость, ОАО «ОЭМК» – восстановление под нагрузкой на установке Бургхардта и ИЧМ АН Украины – высокотемпературное восстановление из жидкой фазы в слое кокса.

Восстановимость и размягчаемость определяли на пробах массой 50–70 г с крупностью кусков 10–35 мм для образцов (табл.2): лабораторных брикетов – №5 и №6, промышленных брикетов №7 и №8 и промывочного агломерата №9 и №10.

Таблица 2 Химический состав и восстановимость исследованных образцов

№ образца	Fe _{общ}	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MgO	Основность CaO/SiO ₂	Восстановимость, %
5	66,9	49,2	41,0	5,5	2,47	0,40	2,22	72,8
6	65,5	48,1	40,1	6,8	2,86	0,47	2,36	70,7
7	58,4	58,8	18,1	9,8	8,1	0,44	1,21	73,0
8	53,2	49,8	20,7	13,2	10,8	0,58	1,22	68,9
9	60,2	44,3	36,8	7,1	8,57	1,07	0,82	15,8 ¹ */55,6 ² *
10	59,95	41,5	39,6	7,27	8,85	1,02	0,82	18,6 ¹ */51,1 ² *

Примечание:

*¹ плотные оплавленные куски агломерата крупностью 20–25 мм;

*² пористые куски крупностью 10–15 мм.

Восстановимость брикетов и агломерата существенно отличаются (табл.2), а размягчаемость промывочного агломерата и лабораторных брикетов вполне сопоставимы, тогда как образцы промышленных брикетов имели более широкий температурный интервал и более низкую температуру начала размягчения (табл.3), что обусловлено большим различием химического состава этих брикетов из-за несовершенной технологии их изготовления.

Таблица 3 Результаты испытаний образцов промывочных материалов на размягчаемость в восстановительной атмосфере

№ образца	5	6	7	8	9	10
$T_{нач}, ^\circ C$	1150	1170	920	990	1180	1180
$T_{кон}, ^\circ C$	1315	1300	1150	1190	1335	1320
$\Delta T, ^\circ C$	165	130	230	200	155	140

Испытания образцов промышленных брикетов и промывочного агломерата (проба массой 800–1000 г., крупность кусков 8–20 мм) в аппарате Бургхардта (восстановление водородом при температуре 900 °С под нагрузкой 1,5 кг/см²) также выявили различный характер их восстановления (рис. 6), но при этом конечная степень восстановления промывочного агломерата и степень его металлизации были выше, чем у брикетов из окалины. Усадка пробы брикетов при восстановлении в аппарате Бургхардта существенно превышала усадку пробы агломерата.

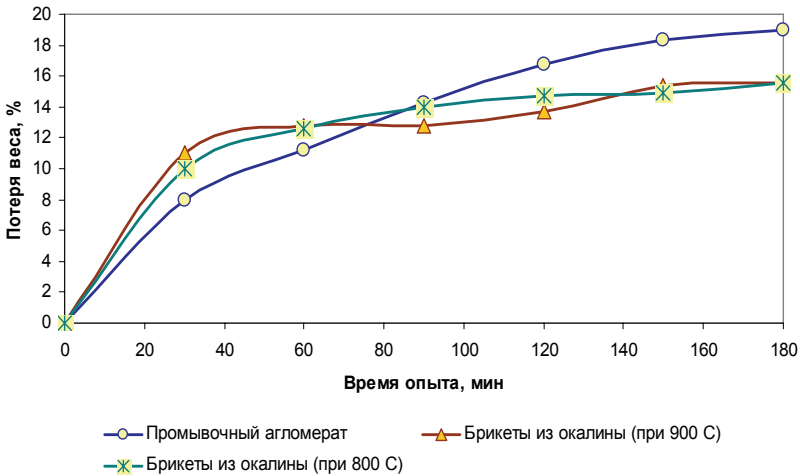


Рис.6. Динамика потери веса исследуемых образцов при восстановлении их в аппарате Бургхардта

Поведение предварительно восстановленных образцов из тех же материалов и обычного агломерата при высокотемпературном нагреве в слое кокса исследовано в лаборатории ИЧМ АН Украины по применяемой там методике [10, 11].

Расплав, образовавшийся из образцов брикетов, промывочного и обычного агломератов, имел содержание закиси железа пропорциональное содержанию FeO в исходных материалах (табл.4).

Таблица 4 Результаты высокотемпературных испытаний агломерата и брикетов из окалины на установке ИЧМ

Показатели	Обычный агломерат	Промывочный агломерат	Брикеты из окалины
T ₁ – температура потери газопроницаемости	1320	1300	1210
T ₂ – температура начала фильтрации	1370	1335	1270
T ₃ – температура максимальной фильтрации	1450	1420	1380
Содержание FeO в шлаке, %	24,87	38,52	48,62
Содержание FeO в исходном материале, %	13,49	40,18	58,4
Доля тугоплавкого остатка, %	13,8	10,8	10,2

Температуры размягчения (потери газопроницаемости слоя) – T₁, начала фильтрации – T₂ и максимальной фильтрации – T₃ расплава через слой кокса, а также доля остающегося на слое и в слое коксе тугоплавкого остатка у исследованных материалов зависят от содержания в них MgO и FeO (рисунок 10,11).

Минимальное содержание MgO, повышенное содержание FeO и основности в брикетах способствовали образованию легкоплавких железокальциевых оливинов с более низкой температурой плавления, чем у фаялита, составляющего основу расплава из кислого промывочного агломерата. Повышенная основность обычного агломерата и максимальное содержание в нем магнезии обусловили высокие температуры размягчения и плавления этого агломерата и образование максимальной доли тугоплавкого остатка слое и в слое кокса.

Результаты выполненных испытаний мелких кусочков брикетов, разумеется, не отражают поведение целых брикетов в доменной печи, а лишь позволяют сделать вывод о том, что при возможном разрушении брикетов в печи из них образуется высокозакисный расплав при более низких температурах, чем аналогичный расплав из агломерата. Т.е. «промывка» коксовой насадки железистым шлаком из брикетов, в таком случае, начинается на более высоком горизонте коксовой насадки.

Для уменьшения восстановимости брикетов из окалины, повышения температуры их размягчения и образования из них расплава в шихту для получения брикетов добавили дисперсные кремнезем и магнезию [7,12] в виде тонкодисперсной пыли газоочистки печей для производства ферросилиция и порошка, содержащего 85% MgO. При нагреве таких брикетов (размеры 70x70x70 мм и 100x70x70 мм) в восстановительной атмосфере (5% водорода, 95% аргона) со скоростью 500 °С в час до температуры 1200 °С степень металлизации железа в них снизилась в 2,5–3 раза. Повышение содержания в брикетах MgO обуславливает образование трудновосстановимых твердых растворов в системе CaO–MgO–FeO–SiO₂ [12], что за-

трудняет восстановление оксидов железа и повышает, тем самым, промышленные свойства брикетов из окалины.

Металлургические свойства железуглеродсодержащих брикетов.

Оценка восстановимости по потере веса при 800⁰С образцов лабораторных брикетов, изготовленных из различных материалов (табл.5), выявила зависимость достигнутой степени восстановления от восстановимости (окисленности) компонентов брикетов (рис.7), содержания и активности углерода в них (таблица 5, рис. 8).

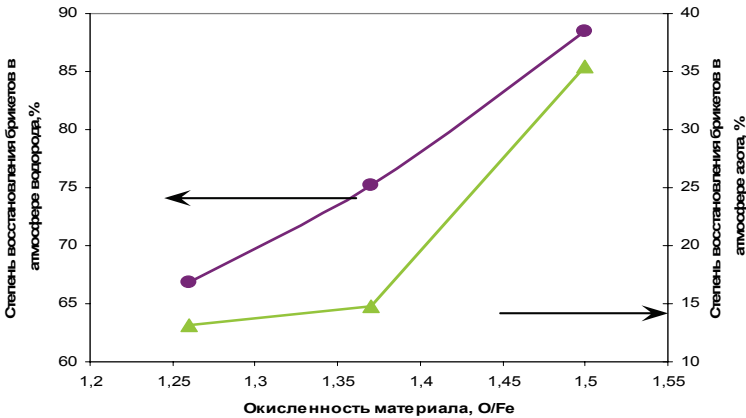


Рис.7. Зависимость степени восстановления брикетов от окисленности материалов

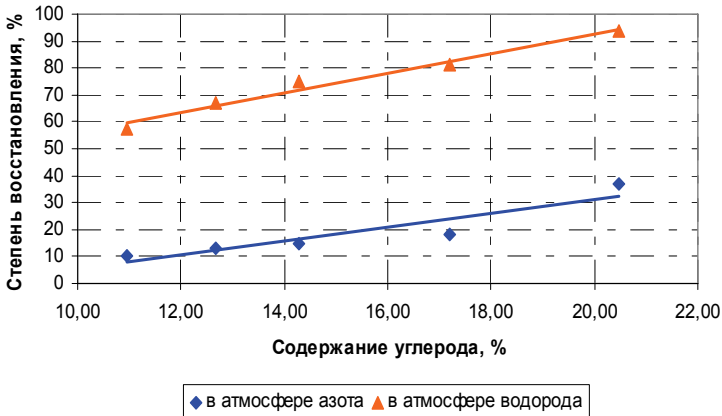


Рис.8. Зависимость степени восстановления брикетов от содержания углерода.

При нагреве испытуемых проб, как в нейтральной, так и в восстановительной атмосфере, максимальную восстановимость имели брикеты из богатой гематитовой руды и древесного угля (№18) и брикеты с макси-

мальным содержанием углерода (№20, 23). По результатам оптического и мессбауэровского анализа образцов брикетов №№ 18–20, 23 выявлено, что при их нагреве до 1200⁰С в нейтральной атмосфере происходит частичное восстановление оксидов железа до металла (без его науглероживания) и образование железистого силикатного расплава. На шлифах из восстановленных брикетов наблюдается остаточный углерод.

Таблица 5 Компонентный состав брикетов, содержание в них С и степень восстановления, %

№ брикета	18	19	20	21	22	23	
Гематитовая руда	73	–	–	–	–	–	
Магнетитовый концентрат	–	71,7	65	–	–	–	
Окалина	–	–	–	70	68	25	
Колошниковая пыль	–	–	–	8	8	–	
Доменный шлам	–	–	–	–	–	50	
Портландцемент	10	11,7	15	10	10	12	
Коксовая мелочь	17*	16,6	20	12	14	13	
Содержание С, %	12,6	14,3	17,2	11,0	12,7	20,5	
Степень восстановления	в токе N ₂	35,4	14,8	18	10,2	13,1	36,7
	В токе H ₂	88,5	75,2	81	57,3	66,8	93,5

Примечание: *древесный уголь

Для изучения восстановимости брикетов из углеродсодержащих доменных и конвертерных шламов были испытаны (нагрев до 1200⁰С в атмосфере аргона –95% и водорода – 5%) лабораторные брикеты (70x70x70 мм) из 10 различных композиций этих материалов (табл.6).

Таблица 6 Компонентный и химический состав брикетов из конвертерного и доменного шламов и степень металлизации после восстановления

№	До-мен. шлам	Конв. шлам	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	C	CaO	Сте-пень мета-лиз.
24	90	–	6,76	50,13	8,30	13,05	1,46	1,82	15,75	1,57	94,4
25	92	–	6,91	51,20	8,02	11,92	1,41	1,72	16,10	1,49	93,3
26	65	25	21,61	38,92	7,29	14,44	1,48	1,58	11,93	1,98	95,6
27	66	26	22,35	39,55	6,98	13,37	1,43	1,46	12,12	1,92	93,9
28	55	35	27,55	34,44	6,89	15,00	1,49	1,48	10,40	2,18	85,3
29	56	36	28,29	35,06	6,57	13,93	1,4	1,36	10,60	2,12	78,9
30	45	45	33,48	29,96	6,48	15,56	1,50	1,38	8,87	2,40	47,0
31	46	46	34,23	30,58	6,17	14,49	1,45	1,27	9,07	2,35	40,1
32	–	90	60,21	9,78	4,67	18,07	1,54	0,94	1,99	3,87	12,1
33	–	92	61,55	9,96	4,32	17,06	1,49	0,81	2,03	3,95	9,96

Брикеты из конвертерного шлама, содержащие 2–3% углерода, имели степень металлизации 10–12%. В брикетах из смеси конвертерного шлама с доменным, содержащих углерод в количестве, близком к стехиометрически необходимому (12–13%), степень металлизации железа достигала 90–95%. Дальнейшее увеличение содержания углерода в брикетах за счет увеличения в них доли доменного шлама не привело к увеличению степени металлизации железа в брикетах (рис.9, 10).

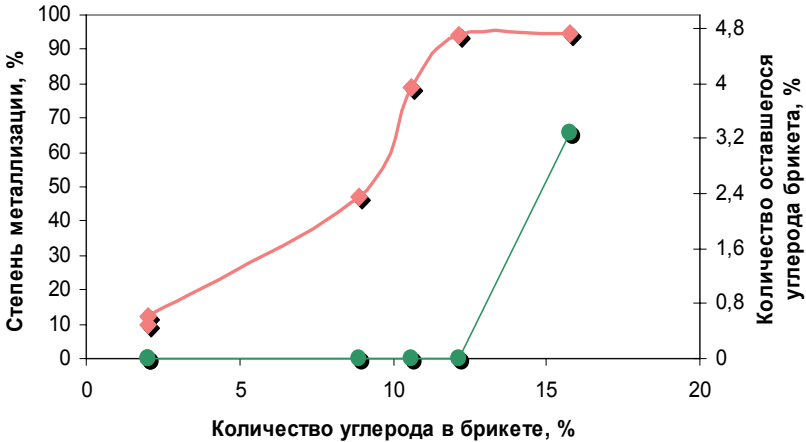


Рис.9 Зависимость степени металлизации брикетов от содержания в них углерода.

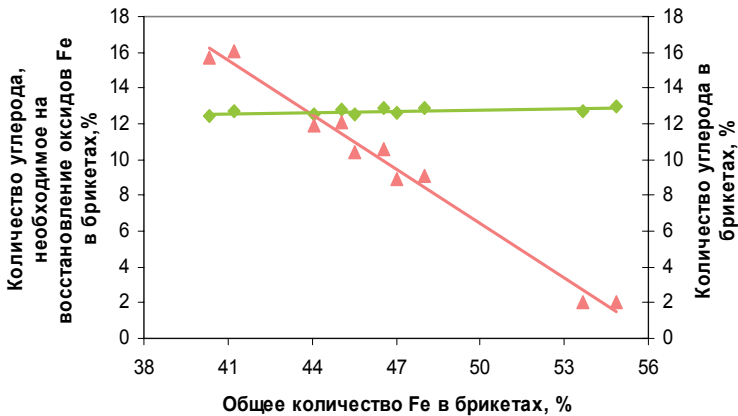


Рис.10. Фактическое и необходимое по стехиометрии для восстановления Fe содержание углерода в брикетах

Таким образом, можно заключить, что для обеспечения максимального коэффициента замены кокса углеродом железо–углеродсодержащих брикетов, содержание углерода в них не должно существенно превышать стехиометрически необходимого.

Эффективность применения брикетов на цементной связке в доменных печах.

Брикеты из конвертерных шламов и коксовой мелочи.

Первый в ОАО «НЛМК» опыт проплавки брикетов на цементной связке, изготовленных методом вибропрессования, проведен в марте 2003 года на доменной печи объемом 1000 м³ [5]. Целью опытных плавов была оценка эффективности технологической схемы производственного рециклинга железо–цинксодержащих шламов путем их окускования и последующей проплавки в доменной печи. Компонентный состав брикетов (65% конвертерного шлама, 20% коксовой мелочи, 15% цемента) при их изготовлении выбирался с учетом ограниченных технических возможностей отделения дозирования и смешивания компонентов шихты для брикетирования и опыта производства брикетов на цементной связке из техногенного железосодержащего сырья на других предприятиях [6,7]. Как показали проведенные позднее лабораторные исследования [13] по оптимизации состава брикетов, указанное содержание коксовой мелочи и цемента в опытной партии брикетов (2500 т) и, соответственно, их основность и содержание в них углерода (табл.7), были завышенными. Расход брикетов в течение периода (10 суток) опытных плавов изменялся от 50–70 кг/т в первые 5 суток до 190 кг/т в последние сутки и составил в среднем 121 кг/т чугуна. Эффективность применения брикетов оценили путем сопоставления полученных результатов работы печи с показателями плавки в базовом периоде, включающем 15 суток работы печи до проплавки брикетов и 7 суток после их проплавки. Техничко–экономические показатели работы печи в опытном и базовом периодах и результаты компьютерного моделирования доменной плавки с применением шламококсовых брикетов приведены в табл.8.

Таблица 7. Химический состав* шламококсовых брикетов [5].

Fe _{общ}	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	C	ZnO
35,1	30,43	16,0	19,9	7,1	1,36	1,12	19,0	1,5

Примечание:*Химический состав брикетов определен путем анализа пробы, приготовленной из 4–х брикетов, отобранных в различные периоды времени их изготовления.

При проплавке брикетов коэффициент замены кокса коксовой мелочью брикетов составил 0,96 кг/кг, а коэффициент замены углерода кокса углеродом брикетов – 0,88 кг/кг. Компьютерное моделирование дало вполне удовлетворительную прогнозную оценку показателей доменной

плавки с использованием железоуглеродсодержащего компонента доменной шихты.

Таблица 8. Показатели доменной плавки при работе печи с использованием и без использования шламококсовых брикетов [5].

Показатели работы доменной печи	Базовый период 1 – 15.03.2003 31.03 – 6.04.2003	Опытный период 20– 30.03.2003	Результаты моделирования*
Производительность, т/сутки	2050	1828	1851
Расход сухого скипового кокса, кг/т	482,5	485,5	459
Расход природного газа, м ³ /т	86,1	80,2	82
Расход брикетов, кг/т	–	121	125
Содержание Fe в шихте, %	59,1	58,06	58,4
Температура дутья, °С	994	966	970
Содержание O ₂ в дутье, %	26,8	26,5	26,5
Давление газа на колошнике, МПа	0,101	0,098	0,101
Содержание Si в чугуне, %	0,72	0,84	0,75
Приведенная** производительность, т/сутки	1931	1828	1819
Приведенный** расход кокса, кг/т	508,7	485,5	470

Примечание:

*Компьютерное моделирование доменной плавки с использованием математической модели доменного процесса;

**Приведение к сопоставимым условиям выполнено с использованием метода пофакторного анализа.

Снижение производительности печи при проплавке брикетов, кроме уменьшения содержания железа в шихте, было обусловлено повышением физического и химического нагрева продуктов плавки, вызванного недостаточной коррекцией рудной нагрузки при увеличении расхода незнакомого для технологов печи компонента шихты, содержащего углерод. На производительность печи оказывали также влияние высокоосновные тугоплавкие шлаки из пустой породы брикетов, медленно ассимилируемые железистыми первичными шлаками, образующимися из агломерата и окатышей, и повышающие, в результате, вязкость этих шлаков.

В целом же результаты опытных плавок показали практическую возможность эффективного применения в доменной плавке нового вида кускового офлюсованного железосодержащего материала, который, благодаря содержащемуся в нем углероду, является самовосстанавливающимся и применение которого приводит к пропорциональному уменьшению расхода кокса. Несмотря на высокую цинковую нагрузку (1590–2190 г/т) и зафиксированное балансом цинка его накопление в печи при проплавке

брикетов, отрицательного влияния цинка на расход кокса не выявлено [5]. Это можно объяснить, частично, тем, что восстановление цинка происходило за счет углерода брикетов, содержание которого превышало стехиометрически необходимое (9–10%) для восстановления оксидов железа брикета. Что касается тепла, затраченного на восстановление цинка углеродом, то оно возвращалось в процесс при окислении паров цинка в шахте печи. Участием углерода брикетов в восстановлении цинка объясняются, в значительной мере, и высокие значения коэффициента замены углерода кокса углеродом брикетов и коэффициента замены кокса коксовой мелочью при ее избыточном содержании в брикетах.

Углеродсодержащие брикеты из железорудного концентрата

Целью опытных плавков с применением брикетов из железорудного концентрата была оценка возможности и эффективности проплавки в значительных количествах брикетов на цементной связке для максимальной замены кокса коксовой мелочью, играющей в составе брикетов роль восстановителя. Для изготовления брикетов использовали магнетитовый железорудный концентрат. Эти брикеты (табл.9), также как и брикеты из конвертерных шламов, были изготовлены с завышенным содержанием коксовой мелочи (20%) и цемента (15%).

Таблица 9. Химический состав промышленных брикетов из рудного концентрата

Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	C
42,3	16,4	42,1	9,8	0,8	6,0	1,1	17,2

Проплавка опытной партии 2475 т рудококсовых брикетов в августе–сентябре 2003 года осуществлялась в 3 этапа с последовательным увеличением расходов брикетов (122, 198, 303 кг/т чугуна). Компонентный состав доменной шихты при проплавке брикетов существенно отличался от состава шихты в базовом периоде и значительно изменялся с увеличением расхода брикетов. В первую очередь это касается окатышей, доля которых в шихте в базовом периоде составляла 23%, а при проплаве брикетов она уменьшалась до 12,7%, 11,8% и 4,3%. Заметно колебалась и доля агломерата в шихте: 76,9%, 80%, 76,3%, 78,4%, соответственно (Таблица 10).

Однако однозначно оценить влияние изменений структуры доменной шихты на газодинамику сухой части столба шихты, зоны когезии и зоны капельного орошения при проплавке рудококсовых брикетов затруднительно в связи отсутствием необходимой для такой оценки информации. Отсутствие на печи системы грохочения загружаемых шихтовых материалов при изменении доли агломерата в шихте, приводила к значительным изменениям прихода мелочи в печь. Уменьшение доли окатышей с одной стороны вызывало увеличение доли мелочи в верхних слоях столба шихты в связи с увеличением доли агломерата, с другой – уменьшение

доли мелочи, образующейся при восстановлении окатышей в средней части шахты печи. В тоже время, увеличение доли брикетов в шихте оказывало разрыхляющее действие на структуру столба шихты во всем его объеме вплоть до зоны когезии. Этим, вероятно, можно объяснить незначительное увеличение приведенной производительности печи с ростом доли брикетов в шихте. Что касается общего негативного влияния расхода брикетов на производительность печи, то оно вызвано, как и в случае шламококсовых брикетов, кроме снижения содержания железа в шихте, образованием из пустой породы брикетов тугоплавкого шлака повышенной основности, что приводило к увеличению вязкости всего первичного шлака. Негативное влияние на вязкость первичных шлаков оказывало, также, избыточное содержание коксовой мелочи в брикетах. Это подтверждается увеличением нижнего перепада давления в печи, особенно во 2-м опытном периоде. В третьем периоде это увеличение было скомпенсировано раскрытием периферии и увеличением давления газа на колошнике (табл. 10).

Таблица 10. Показатели работы печи при проплавке брикетов из железорудного концентрата и коксовой мелочи

Показатели плавки \ периоды работы печи	21–25.08 6–10.09 База	26–30.08 1	31.08– 02.09 2	02–04.09 3	26.08– 04.09 Опыт
1	2	3	4	5	6
Производительность, т/сутки	1908	1732	1781	1725	1743
Расход:					
агломерата, кг/т	1194	1325	1283	1348	1319
окатышей, кг/т	371	210	199	67	168
брикетов, кг/т	–	122	198	303	192
конвертерного шлака, кг/т	75	–	–	–	–
Содержание Fe в шихте, %	58,83	58,02	57,3	55,98	57,26
Расход кокса, кг/т	505	489	473	497	487
Расход природного газа, м ³ /т	74	70	76	79	74
Содержание O ₂ в дутье, %	27,3	26,9	27,4	27,5	27,2
Температура дутья, °С	961	960	962	961	961
Давление газа на колошнике, ати	1,00	0,98	0,96	1,00	0,98
Температура периферии, °С	516	484	483	527	495
Нижний перепад давления, ати	0,869	0,860	0,880	0,866	0,867

Верхний перепад давления, ати	0,131	0,140	0,120	0,124	0,13
Содержание: [Si] в чугуна, %	0,74	0,85	0,64	0,86	0,79
Приведенная производительность, т/сут	1908	1780	1812	1828	1815
Приведенный расход кокса, кг/т	505	480	474	484	480
Коэффициент замены кокса коксовой мелочью брикета, кг/кг	–	1,02	0,78	0,35	0,66
Масса коксовой мелочи брикетов, остающейся в печи*	–	<u>20,0</u> 100	<u>33,5</u> 200,6	<u>49,3</u> 348,8	<u>31,7</u> 348,8

Примечание:

*Расчетное количество избыточной коксовой мелочи брикетов (остающейся в брикетах после полного восстановления оксидов железа в них): в числителе – тонн в сутки, в знаменателе – суммарное количество избыточной коксовой мелочи брикетов в конце периода.

Эффективность использования коксовой мелочи, содержащейся в брикетах, уменьшалась пропорционально их количеству, что связано, в первую очередь, с завышенным содержанием углерода в брикетах, которое на 5% превышало стехиометрически необходимое (12,2%) для восстановления оксидов железа брикета. Коксовая мелочь, не израсходованная на восстановление железа в самом брикете и железа из первичных шлаков, оставалась в коксовой насадке, снижая ее дренажную способность. Количество этой коксовой мелочи из брикетов по мере увеличения их расхода увеличивалось и накапливалось в печи, оставаясь в коксовой насадке (рис. 11). Этому способствовало и то, что количество железистых первичных шлаков, образующихся из агломерата и окатышей, при этом уменьшалось, пропорционально чему уменьшалось количество углерода, требуемое на прямое восстановление железа из этих шлаков (рис.12).

С увеличением расхода брикетов, содержащих углерода коксовой мелочи в 1,5 раза больше, чем необходимо по стехиометрии для восстановления оксидов железа, должно усиливаться их негативное влияние на дренажную способность коксовой насадки в печи. Дренажную способность горна оценили с помощью расчетного индекса «DMI», который косвенно оценивает дренажную способность горна путем сопоставления фактического содержания углерода в чугуна на выпусках, зависящего от поверхности и времени контакта чугуна с коксом в горне, и содержания углерода в насыщенном состоянии. Увеличение содержания коксовой мелочи в коксовой насадке увеличивает поверхность контакта кокса с чугуном, приводит к увеличению содержанию углерода в чугуна.

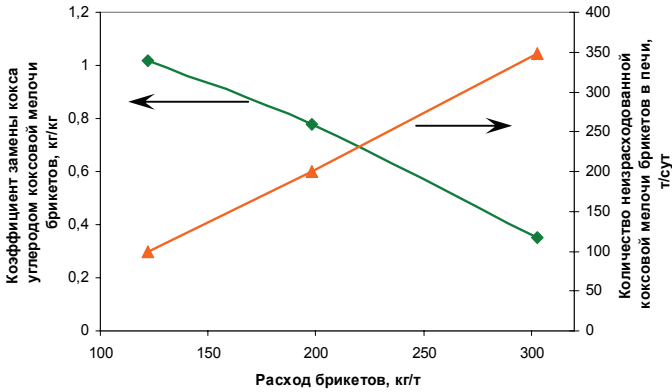


Рис.11. Накопление в печи коксовой мелочи брикетов и соответствующее снижение коэффициента замены кокса коксовой мелочью брикетов с увеличением их расхода

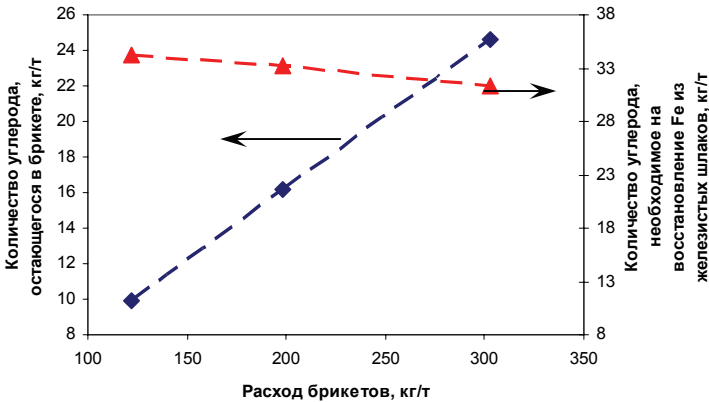


Рис.12. Зависимость количества углерода, остающегося в брикете и необходимого на восстановление Fe из железистых шлаков агломерата и окатышей, от расхода брикетов на плавку

При этом величина индекса “DMI” уменьшается, что свидетельствует об уменьшении дренажной способности коксовой насадки в горне. Индекс рассчитывается по формуле [14]:

$$DMI = 2 \cdot T_c - 12062 \cdot [S] - 12840 \cdot [P] - 15564 \cdot [S] + 1089 \cdot [Mn] - 38911 \cdot [C] - 190 \cdot B_{шл} - 69046$$

где T_c – температура чугуна, $^{\circ}C$

[Si], [P], [S], [Mn], [C] – массовая доля указанных элементов в чугуне, %

$B_{шл}$ – основность шлака (CaO/SiO_2).

Расчет индекса “DMI” подтвердил накопление коксовой мелочи в коксовой насадке. Показатель “DMI” в периоде работы печи после проплавки брикетов (6–10.09.2003) уменьшился в 1,34 раза по сравнению с периодом ее работы до их проплавки (21–25.08.2003), имея соответственно в эти периоды значения 127 и 170.

Коэффициент замены кокса коксовой мелочью брикетов по указанным причинам снижался по мере увеличения их расхода (рис.11). Таким образом, анализ результатов проплавки в доменной печи значительной партии брикетов с повышенным содержанием коксовой мелочи полностью подтвердил полученный по результатам лабораторных испытаний вывод о наличии оптимального содержания коксовой мелочи или другого углеродсодержащего материала (углерода) в железобуглеродсодержащих брикетах для доменной плавки [13], которое определяется содержанием в них железа и его окисленностью, а также, очевидно, гранулометрией углеродсодержащего материала и активностью углерода в нем.

Изучение поведения брикетов из железорудного концентрата и коксовой мелочи при высокотемпературном нагреве в восстановительной атмосфере] и промышленный опыт их применения в доменной плавке позволяют заключить, что такие брикеты, при оптимальном содержании в них углерода и минимально необходимом для обеспечения их прочности содержании цемента, являются полноценным подготовленным самовосстанавливающимся компонентом доменной шихты, применение которого обеспечивает значительное снижение расхода кокса в доменной плавке. Доля такого компонента в железосодержащей части доменной шихты лишь незначительно ограничивается требуемой производительностью печи и может достигать, в зависимости от последней, 50% и более.

Брикеты из доменных шламов, прокатной окалина и коксовой мелочи.

Утилизация доменных шламов из шламохранилища в составе аглошихты ухудшает показатели работы агломашин, а углерод шламов не используется в процессе. Количество шламов в аглошихте лимитируется, также, допустимым по техническим условиям содержанием цинка в агломерате. Альтернативной технологией рециклинга таких шламов является их брикетирование и проплавка в доменной печи. Для оценки эффективности такой схемы рециклинга изготовили опытную партию брикетов, в состав которых, кроме доменных шламов (59%) и цемента (11%), входили прокатная окалина (20%) и коксовая мелочь (10%). Средний химический состав брикетов представлен в табл.11.

Изготовленные брикеты (2560 т) проплавляли в течение 11 суток (с 29.11.2004 г. по 9.12.2004 г.) в доменной печи объемом 2000 м³. Средний расход брикетов за период составил 62 кг/т при колебаниях по суткам от 36 кг/т до 81 кг/т. Эффективности проплавки шламококсовых брикетов оценили путем сопоставления показателей плавки в опытном и базовом периодах работы печи. В качестве показателей базового периода исполь-

зовали усредненные показатели за периоды работы печи до (6–10.11.04, 26–28.11.04) и после проплавки брикетов (11–15.12.04). Период с 11 по 25 ноября не использовался для сопоставления из-за использования в это время повышенной доли кокса Московского коксо–газового завода, который не применяли во время опытных плавок. Использование брикетов привело к существенному снижению расхода кокса (табл.12).

Таблица 11. Химический состав и интервалы колебаний содержания оксидов и элементов в брикетах

Компоненты	Fe общ.	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	П.п.п.	ZnO
Среднее значение	33,9	17,81	27,25	8,78	14,90	1,06	1,71	26,39	0,26
Пределы колебаний	31,9– 34,7	14,29– 19,68	24,65– 30,07	7,5– 9,8	14,2– 15,4	0,8– 1,3	1,01– 2,03	23,4– 26,3	0,22– 0,31

Таблица 12. Показатели работы печи при проплавке железо–углеродсодержащих брикетов из доменных шламов и окалины.

Показатели работы печи	Размерность	Базовый период	Опытный период
Производительность печи	т/сутки	4097	3960
Расход брикетов	кг/т	–	62
Расход сухого скипового кокса	кг/т	459	458
Содержание кислорода в дутье	%	26,6	26,5
Температура дутья	°С	1153	1154
Давление на колошнике	ати	1,45	1,39
Суммарная степень использования газа	%	44,9	44,3
Температура периферийных газов	°С	359	417
Верхний перепад давления	ати	0,175	0,170
Нижний перепад давления	ати	1,128	1,107
Содержание железа в шихте	%	59,23	58,28
Содержание [Si] в чугуна	%	0,76	0,69
Приведенная* производительность печи	т/сутки	4097	4056
Приведенный* расход кокса	кг/т	459	447,6
Коэффициент замены кокса коксовой мелочью	кг/кг	–	
Коэффициент замены углерода кокса углеродом брикетов	кг/кг	–	0,63

При проплавке брикетов из-за их геометрической формы и размеров брикетов, вызывающих повышенное кострение при их выгрузке из бункеров для добавок, брикеты вынужденно выгружали в основные бункера шихтоподачи, а загрузку агломерата вели одной стороной. Это приводило к быстрому опорожнению бункеров, в результате чего выгрузку агломерата из агловозов производили в почти пустые бункера, что вызывало дополнительное разрушение агломерата, увеличение прихода в печь дополнительного количества его мелочи и нарушало ровность хода печи. С целью выравнивания хода печи уменьшили рудную нагрузку на периферии (усилили «периферийность» хода печи), что привело к уменьшению степени использования газа и увеличению температуры газов на периферии. Принятые меры обеспечили поддержание газодинамической напряженности практически на том же уровне, что и базовом периоде. Незначительное снижение производительности доменной печи при проплавке брикетов вызвано главным образом уменьшением содержания железа в шихте, а также негативным влиянием повышенной основности и вязкости шлаков, образующихся из оксидов пустой породы брикетов.

Что касается более низкого значения коэффициента замены углерода кокса углеродом брикетов, по сравнению с полученным при проплавке брикетов из конвертерного шлама (0,88 кг/кг), то это объясняется более значительным превышением содержания углерода в брикетах его стехиометрически необходимой величины (9,3%). Количество углерода, поступающего в брикеты с углеродсодержащим доменным шламом, было бы вполне достаточно для полного восстановления в них железа. Лабораторные исследования показали [13], что углерод доменного шлама является активным восстановителем и обеспечивает восстановление всего железа в брикете при содержании углерода отвечающем стехиометрически необходимому. Добавка коксовой мелочи при изготовлении данных брикетов была излишней и избыточный углерод коксовой мелочи мог принимать участие в восстановлении железа только из первичных железистых шлаков, образующихся из агломерата и окатышей.

Цинковая нагрузка при проплавке брикетов составляла 294 г/т и значительно превышала таковую в базовом периоде (163 г/т). Последствиями повышенной цинковой нагрузки были снижения нагрева печи, связанные с оползанием цинксодержащего гарнисажа в конце периода проплавки брикетов (4.12.04) и после его окончания (10.12.04 и 16.12.04).

Промывочные брикеты из окалины. Периодическое производство промывочного агломерата, используемого для промывки горна доменных печей негативно сказывается на показателях работы аглофабрики и стабильности состава обычного агломерата. В связи с этим оценили возможность и эффективность замены промывочного агломерата брикетами из окалины [15,16]. Опытная партия промывочных брикетов изготавливалась в течение 3-х месяцев из различных видов окалины, поступающей на

брикетирование без усреднения с разных площадок накопления и временного хранения. Кроме окалины использовали, также, значительное количество металлоконцентрата фракции 0–5 мм, полученного при переработке конвертерного шлака. Производимые брикеты имели цилиндрическую форму 120x90 мм и до проплавки на доменных печах накапливались и хранились на открытом складе. Брикеты использовали в качестве штатного промывочного материала на двух доменных печах объемом 2000 м³. Оценку эффективности применения брикетов из окалины проводили путем сравнения результатов работы печей при использовании для промывки горна брикетов и промывочного агломерата.

Брикеты из окалины на цементной связке использовали для промывки горна на доменных печах №3 и №4. Промывки горна проводили путем загрузки промывочного материала в количестве от 6 до 40 кг/т в течение 0,5–1,5 суток. Как использование промывочного агломерата, так и использование брикетов способствовало стабильной и производительной работе доменных печей без нарушения газодинамического режима плавки. На доменной печи №3 (табл.13) максимальная приведенная производительность и минимальный приведенный расход кокса получены в период повышенного расхода промывочного агломерата.

Таблица 13 Показатели работы доменной печи №3 при использовании промывочного агломерата (Вариант А) и промывочных брикетов (Вариант Б).

Показатели работы печи	Вариант А		Вариант Б
	4–12.05.06	6–14.06.06	29.05–06.06.06
Производительность, т/сут	4422	4335	4248
Расход кокса, кг/т	414	423	423
Агломерат, кг/т	1494	1417	1452
Промывочный агломерат, кг/т	5	32	0
Брикеты промывочные, кг/т	0	0	10
Окатыши Лебединские, кг/т	97	192	196
Содержание Fe в шихте, %	59,16	58,92	58,92
Природный газ, м ³ /т	104	99	102
Содержание O ₂ в дутье, %	28,4	28,7	28,7
T _{дутья} , °C	1103	1104	1109
Давление под колошником, кПа	138	138	137
Содержание [Si] в чугуна, %	0,56	0,63	0,63
ΔP _в , кПа	16	17	17
ΔP _н , кПа	119	117	117
Индекс газопроницаемости (Γ _п * 10 ⁻³)	21092,5	21188,4	21367,5
Производительность приведенная, т/сут	4422	4565	4507
Расход кокса приведенный, кг/т	414	388	393

Повышенная производительность доменной печи №4 и минимальный расход кокса имели место во время и после использования промывочных брикетов из окалины. Для оценки эффективности применения промывочных материалов использовали также следующие расчетные критерии, позволяющие количественно определить влияние на состояние коксовой насадки в горне проведенных промывок:

$-\Delta r_d = r_d(2) - r_d(1)$ – разность степеней прямого восстановления железа в периоды работы печи во время промывки и до промывки горна, %;

$-\Delta(DMI) = (DMI)_2 - (DMI)_1$ – разность индексов проницаемости коксовой насадки в периоды работы печи во время промывки и до промывки горна, б/р.

Комплексная оценка по сумме расчетных критериев эффективности промывки показывает, что применение обоих видов промывочных материалов приводит к повышению дренажной способности коксовой насадки (Таблицы 14, 15). Однако промывочный эффект от применения брикетов из окалины был несколько ниже, чем при использовании агломерата. В значительной мере это объясняется тем, что абсолютное количество загруженного промывочного агломерата в рассмотренные периоды более, чем в 2 раза превышало количество загруженных брикетов.

Таблица 14 Результаты расчета критериев эффективности промывки для ДП№3

ДП№3	Промывки агломератом		Промывки брикетами	
	04.05.06	06.06.06	31.05.06	02.06.06
Изменение степени прямого восстановления				
$\Delta r_d = r_d(2) - r_d(1)$	11,1	3,1	3,1	3,3
Изменение показателя «DMI»				
$\Delta(DMI) = DMI(2) - DMI(1)$	57	26	23	32

Таблица 15 Результаты расчета критериев эффективности промывки для ДП№4

ДП№4	Промывки агломератом		Промывки брикетами	
	17.12.05	19.12.05	16.06.06	17.06.06
Изменение степени прямого восстановления				
$\Delta r_d = r_d(2) - r_d(1)$	5,5	6,0	2,3	5,4
Изменение показателя «DMI»				
$\Delta(DMI) = DMI(2) - DMI(1)$	46	26	19	12

Энергетическая оценка рециклинга железосодержащих отходов путем их брикетирования и проплавки в доменной печи.

Оценка энергозатрат на рециклинг железосодержащих отходов путем их брикетирования с последующей проплавкой брикетов в доменной печи применительно к конвертерным шламам и окалине была выполнена [17] в сопоставлении с уже применяемыми промышленными схемами их утили-

зации. Переработка Fe–Zn–содержащих пылей и шламов практически во всех реализованных в промышленном масштабе процессах завершается получением чугуна. В связи с этим оценивали две технологические схемы рециклинга конвертерных шламов:

А: получение шламококсовых окатышей → металлизация окатышей во вращающейся печи → проплавка металлизированных окатышей в доменной печи.

Б: Получение шламококсовых брикетов на цементной связке → проплавка брикетов в доменной печи.

Расход кокса на выплавку чугуна определяли с помощью математической модели доменного процесса для одних и тех же условий плавки: параметры дутья, расход и состав вдуваемого топлива, состав шихты, состав чугуна, масса железа конвертерных шламов, вносимого в печь с металлизированными окатышами или со шламококсовыми брикетами [8].

Суммарные энергозатраты на выплавку чугуна из конвертерных шламов при их утилизации по двум альтернативным технологическим схемам оценивали в виде расхода условного топлива (табл. 16).

Энергозатраты на рециклинг конвертерных шламов по первой технологической схеме существенно выше. В расчете на годовой выход конвертерных шламов 200000т разница в расходе топлива на их переработку рассмотренными технологиями составит:

По коксу – $0,1022 \times 200000 = 20440$ т/год

По коксовой мелочи – $0,0348 \times 200000 = 6906$ т/год

По смешенному газу – $229,6 \times 200000 = 45920000$ м³/год

Таблица 16 Расход энергоносителей на производство чугуна по вариантам

Расход материалов, топлива и энергии на 1 т чугуна	Базовый вариант	Вариант А	Вариант Б
Кокс, кг	454,5/458,3	443,6/447,4	429,8/433,5
Коксовая мелочь, кг	–	24,9/25,0	20,0/20,2
Природный газ, м ³	98/113,6	98/113,6	98/113,6
Смешанный газ, м ³	–	31/8,2	
Кислород, м ³	69/20,7	68,6/20,6	58,2/17,5
Электротенергия, кВт·час	23,5/8,7	36,0/13,3	29,0/10,7
Топливо на нагрев дутья, кг у.т.	62,0	61	62,2
Суммарный расход энерго-ресурсов, кг у.т.	663,3	689,0	657,5
Выход колошникового газа, кг у.т.	245,8	250	249
Суммарный расход условно-го топлива, кг у.т.	417,5	439	408,5

Примечание: в знаменателе расход в кг условного топлива.

Кроме того, дополнительные выбросы CO_2 в атмосферу по первой технологии составляют 116836 т/год. По второй технологии увеличения выбросов CO_2 в атмосферу не происходит. Аналогично сопоставили суммарные затраты топлива на выплавку чугуна из промывочного агломерата, спеченного из окалины, и на выплавку чугуна из брикетов на цементной связке, полученных также из окалины и пыли газоочистки ферросплавных печей (табл.17).

Таблица 17. Расход энергоносителей на производство чугуна при использовании доменной плавке промывочного агломерата (Вариант А) и брикетов (Вариант Б) из окалины

Показатели процесса	Вариант А	Вариант Б
Расход энергоносителей и энергии на 1 т чугуна:		
Кокс, кг/т	427,9/431,5	429,5/433,1
Природный газ, м ³ /т	92/105,4	92/105,4
Кислород, м ³ /т	88/26,4	87/26,1
Коксовая мелочь, кг/т	14,8/14,8	0
Смешанный газ, м ³ /т	3,2/0,8	0
Электроэнергия, кВт*ч/т	32/11,8	29/10,7
Суммарное энергопотребление, кг у.т./т	590,7	575,3
Выход вторичных энергоресурсов, кг у.т./т	211,7	210
Суммарный расход условного топлива, кг/т	379,0	365,3

Примечание: в знаменателе расход в кг условного топлива за вычетом вторичных энергоресурсов.

Рециклинг окалины путем ее агломерации реализуется с более высоким расходом топлива по сравнению с брикетированием. Затраты топлива на агломерацию окалины значительно превышают дополнительный расход кокса при проплавке брикетов из окалины, связанный с увеличением выхода шлака и наличием химически связанной воды в брикетах. При расходе окалины в доменной плавке в количестве 150 кг/т чугуна это превышение по видам топлива составляет:

- условного топлива – 13700 т/год;
- коксовой мелочи – 13200 т/год;
- смешанного газа – 3195000 м³/год.

Дополнительные выбросы CO_2 в атмосферу при рециклинге окалины через агломерацию составляют для указанного количества окалины 43922 т/год.

Заключение. Прочность на сжатие брикетов на цементной связке из оксидных техногенных и природных железосодержащих материалов, содержащих и не содержащих углерод, полученных методом вибропрессования, при содержании цемента 8–10% составляла для большинства материалов не менее 30 кг/см² и обеспечивала их сохранность при перегрузках и транспортировке с выходом мелочи (–10 мм) не более 5–7%.

Все брикеты из оксидных железосодержащих материалов после нагрева в восстановительной атмосфере до 1150–1200⁰С. сохраняли форму и упрочнились за счет образования плотной структуры из железистых оливинов и юстита, а также поверхностного слоя металлического железа.

Брикеты из окалины могут успешно применяться в качестве материала для промывки горна доменных печей вместо промывочного агломерата. Промывочные свойства таких брикетов регулируются добавками в их состав кремнеземистых и магнезиальных материалов.

Восстановление оксидов железа в железобуглеродсодержащих брикетах осуществляется как газообразным восстановителем, так и углеродом. Максимальная эффективность использования углерода брикетов при их проплавке в доменной печи достигается когда его содержание не превышает стехиометрически необходимого для восстановления оксидов железа брикетов.

Проплавка железо–углеродсодержащих брикетов из техногенного и природного сырья в доменных печах объемом 1000 м³ и 2000 м³ показала, что они являются самовосстанавливающимся компонентом доменной шихты, применение которого обеспечивает, при оптимальном содержании в них углерода и цемента, снижение расхода кокса на выплавку чугуна пропорциональное количеству используемых брикетов. Оптимальное количество углерода в составе железо–углеродсодержащих брикетов определяется содержанием и окисленностью железа, а также гранулометрией углеродсодержащего компонента брикетов и активностью углерода в нем.

Брикеты из железорудного концентрата и коксовой мелочи, при оптимальном содержании в них углерода и цемента, являются полноценным подготовленным компонентом доменной шихты, применение которого обеспечивает значительное снижение расхода кокса в доменной плавке. Доля такого компонента в железосодержащей части доменной шихты лишь незначительно ограничивается требуемой производительностью печи и может достигать, в зависимости от последней, 50% и более. Превышение содержания коксовой мелочи в составе брикетов выше оптимального приводит к уменьшению эффективности ее использования, к снижению коэффициента замены кокса коксовой мелочью, а при повышенном расходе брикетов – к замусориванию коксовой насадки в горне и снижению ее дренажной способности.

Промышленный опыт использования брикетов из окалины для промывки горна доменных печей показал высокую эффективность этой технологической схемы рециклинга окалины, сопоставимую со схемой использования окалины для производства промывочного агломерата. Промывочные свойства брикетов повышаются при использовании для их изготовления кремнеземистых и магнезиальных добавок.

Компьютерное моделирование доменной плавки с применением брикетов из техногенных материалов и металлизированного сырья и промывочного материала из них, а также балансы энергозатрат на рециклинг техно-

генных материалов по альтернативным технологиям показали очевидные энергетические и экологические преимущества схемы рециклинга с использованием технологии брикетирования.

- 1 *Landow Mark P.* Benefits of recycling blast furnace waste materials at National Steel – Great Lakes Division by cold bonded briquetting / Mark P. Landow, Mark I. Crawford, Marcelino Martinez // Ironmaking conference proceedings.–2000. – P.225–231
- 2 *Singh Maneesh.* Swelling behavior of cement – bonded briquettes / Maneesh Singh, Bo Björkman //3rd International Conference on Science and technology of ironmaking. Düsseldorf, 16–20 June.– 2003. – P.359–364.
- 3 *Использование железокосовых брикетов на цементной связке в доменной плавке / А.С.Белкин, Ю.С. Юсфин, И.Ф.Курунов [и др.] // Металлург.–2003.– №4. – С.39–41.*
- 4 *Oxygen Cupola for recycling waste oxides from an integrated steel plant. / Michael Peters, Peter Schmöle, Klaus Kesseler, Ludger Stahl. // 3rd International Conference on Science and technology of ironmaking. – Düsseldorf, 16–20 June, 2003. – P.349–352.*
- 5 *Опыт использования в шихте доменной печи брикетов из железозинкосодержащих шламов / И.Ф. Курунов, В.М. Кукарцев, И.С. Яриков и др.] // Металлург .–2003.– №10. –С.36–38.*
- 6 *Innovative technology of composite metallurgical raw materials production out of iron and carbon containing wastes / V.I.Kotenev, E.Y.Barsukova, I.F.Kurunov. // Proceeding of the 11th International Congress of Ironmaking. – Ostrava, Czechia. October, 2004. – P.17–19*
- 7 *Котенев В.И., арсукова Е.Ю.Б, Мурат С.Г.* Производство и использование металлургических брикетов в ОАО «Тулачермет» // Металлург. Спецвыпуск. –2005. –№6.– С.33–36.
- 8 *Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В.* Химическая технология вяжущих материалов: Учебник для вузов.– М.: Высш.школа, 1980. – 472 с.
- 9 *Бутт Ю.М., Тимашев В.В.* Портландцемент (минералогический и гранулометрический составы, процессы модифицирования и гидратации). – М., Стройиздат, 1974. – 328 с.
- 10 *Познание процессов доменной плавки. / Коллективный труд под ред. В.И. Большакова. Днепропетровск. :Пороги, 2006.–440 с.*
- 11 *Товаровский И.Г., Гладков Н.А., Нестеров С.А.* Изучение фильтрации расплавов через коксовую насадку при использовании различных шихтовых материалов. // Сталь. – 1996. – №3. –С.6–11.
- 12 *Schairer J.F.* System CaO·SiO₂ – CaO·MgO·SiO₂ (monticellite) – FeO // Journal America Ceramic Society. – 1950. –33 [5]. – P.164.
- 13 *Курунов И.Ф., Малышева Т.Я., Большакова О.Г.* Исследование фазового состава железорудных брикетов с целью оценки их поведения в доменной печи. //Металлург. – 2007. – №10. – С.41–46.
- 14 *Heart management at Sidmar for an optimal hot metal and slag evacuation /R.Sergeant, B L. onte, K.Huysse and other.// The 5th European coke and ironmaking congress. Proceeding. Second volume.Wel:3. – Stockholm. – 2005.*

- 15 *Курунов И.Ф., Большакова О.Г.* Брикетты для промывки горна доменных печей // И.Ф. Курунов, // *Металлург.* – 2007. – №5. – с. 46–50
- 16 *Опыт* промывки горна доменных печей брикетами из окалина / И.Ф.Курунов, О.Г.Большакова, Э.М.Щеглов и др. // *Металлург.*– 2007. – № 6. – С.36–39.
- 17 *Курунов И.Ф., Титов В.Н., Большакова О.Г.* Анализ эффективности альтернативных путей рециклинга железосодержащих металлургических отходов // *Металлург.* – 2006. – №11. – С. 39–43

Сведения об авторах:

Курунов Иван Филиппович, д.т.н., профессор, главный доменщик
ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

Титов В.Н., ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

Малышева Т.Я., Московский государственный институт стали и сплавов (Технологический университет)

Большакова О.Г., Московский государственный институт стали и сплавов (Технологический университет)