

DOI 10.52351/00260827\_2021\_07\_

УДК

## СИНЕРГИЯ АГЛОМЕРАЦИИ И БРИКЕТИРОВАНИЯ В ДОМЕННОМ ПРОЦЕССЕ

© **Бижанов Айтбер Махачевич**<sup>1</sup>, канд. техн. наук (abizhanov@jcsteele.com);**Кристоф Оберто**<sup>2</sup>, (CAubertot@direxa.com)<sup>1</sup> J.C.Steele&Sons, Inc. США, г. Стейтсвилл, Северная Каролина<sup>2</sup> Direxa Engineering, LLC, США, г. Денвер, Колорадо

Статья поступила 19.05.2021 г.

В статье показана концепция частичной замены агломерата в доменной шихте брикетами экструзии, создающая основу для синергии агломерации и брикетирования. Проанализированы критерии сопоставимости свойств и производственных параметров для агломерата и брикетов экструзии (брэсков) и обоснована принципиальная возможность частичной замены агломерата брэсками. Замена 50% агломерата в доменной шихте, означающая пропорциональное снижение его производства, приведет к двукратному снижению вредных выбросов аглофабрики и к производству агломерата более высокой прочности, диктуемой структурой обновленной таким образом доменной шихты. На этапе производства агломерата такая перемена приведет к снижению суммарного расхода железорудного концентрата, к отказу от применения колошниковой и аспирационной пылей в аглошихте с выводом таких материалов в брикетирование. Вследствие повышения качества агломерата существенно снизится образование отсева, возрастут расходы доломита и известняка, увеличится расход твердого топлива. В доменной шихте произойдут такие перемены, как снижение расхода скипового агломерата и сухого скипового кокса. Приведены результаты расчета вариантов частичной замены агломерата при долях агломерата в шихте 10,20 и 30%.

**Ключевые слова:** агломерат; окатыши; брикет экструзии (брэск); синергия; частичная замена агломерата; доменная шихта.

**В**ыплавка чугуна и стали, помимо общеизвестного негативного воздействия на окружающую среду, сопровождается образованием значительного количества железосодержащих отходов, прямая переработка которых невозможна или затруднена без окускования. Агломерация и производство окатышей – наиболее распространенные методы промышленного окускования, основанные на высокотемпературной обработке железосодержащего сырья и сопряженные со значительными выбросами загрязняющих веществ в атмосферу (агломерация – до 20 кг/т агломерата, производство окатышей – 2 кг/т окатышей).

Брикетирование долгое время оказывалось неконкурентоспособным по сравнению с агломерацией и производством окатышей из-за недостаточной производительности брикетного оборудования и несоответствия свойств брикета требованиям металлургического передела.

Ситуация изменилась с появлением на рынке окускования адаптированной для производства брикетов экструзии (брэсков) технологии жесткой экструзии, широко применяющейся в более чем 60 странах мира для производства керамического кирпича. Успех уже первых реализованных проектов обусловил возможность конкурентирования данной технологии с агломерацией.

С целью обоснования такой возможности сопоставим рассматриваемые технологии окускования с точки зрения металлургических свойств продуктов (агломерата и брикетов экструзии), производительности агломерационного и экструзионного оборудования, а также воздействия на окружающую среду.

Механическую прочность брикетов экструзии и агломерата целесообразно сопоставлять при барабанных испытаниях в соответствии со стандартом ISO 3271 (ГОСТ 15137–77 «Руды железные и марганцевые, агломераты и окатыши. Метод определения прочности во вращающемся барабане»). Метод основан на механической обработке брикетов во вращающемся стальном барабане (диам. 1000 мм, длина 500 мм, 200 оборотов при частоте вращения барабана  $25 \pm 1$  об/мин) и последующем определении ситовым анализом изменения гранулометрического состава пробы (с размерами менее 0,5 мм, 0,5–6,3 мм и более 6,3 мм), характеризующего способность брикетов сопротивляться удару и истиранию при транспортировании и перегрузках. Относительная доля фракции с размерами частиц менее 0,5 мм характеризует сопротивление брикета истиранию (AI, abrasion index), а доля крупной фракции (+6,3 мм) – его ударную прочность (TI, tumble index). Каче-

Таблица 1. Прочность брэкса на основе прокатной окалины в барабанной пробе

Масса образца, г	Образец брикета			
	1	2	3	4
Исходная масса $m_0$	15012	15001	14999	15000
$m_1$ (+6,30 мм)	12917	12948	12943	12909
$m_2$ (+0,5 мм)	239	215	229	221
$m_3$ (-0,5 мм)	1690	1658	1685	1735
$d$ ( $m_0 - m_1 - m_2 - m_3$ )	166	180	142	135
$D$ ( $d/m_0$ ), %	1,1	1,2	0,9	0,9
TI ( $m_1/m_0$ ), %	86,0	86,3	86,3	86,1
AI ( $m_0 - m_1 - m_2$ )/ $m_0$ , %	12,4	12,3	12,2	12,5
TI (среднее)	86,2	–	–	–
AI (среднее)	12,3	–	–	–

ство агломерата считается удовлетворительным, если его ударная прочность по такой методике не ниже 70%. В табл. 1 приведены результаты измерения прочности брэксов из прокатной окалины на цементной связке. Видно, что по параметру ударной прочности брэксы превосходят браковочный предел для агломератов. Несколько более высокие значения величин истирания объяснены в работе [1] на основе результатов численного моделирования барабанной пробы брэксов. Полученные результаты связывают рост истираемости с особенностями падения брикетов на стальную поверхность барабана и создают основу для пересмотра браковочных пределов прочности на истирание брикетов в барабанной пробе, что позволит адекватно сопоставлять этот параметр с таковым для агломерата.

Сравнение горячей прочности агломерата и брэксов различного состава проведено в работе [2]. Исследовали металлургические свойства брэксов, изготовленных из доменных и конвертерных шламов, а также железуглеродсодержащих брэксов из железорудного концентрата Стойленского ГОКа и коксовой мелочи (табл. 2), которые также рассматривали как перспективный компонент шихты доменных печей.

Испытания шламовых брэксов и брэксов из концентрата на горячую прочность по стандарту ISO 4696 выявили большое преимущество брэксов из концентрата ( $RDI_{+6,3} = 96,5\%$ ) по сравнению со шламовыми брэксами ( $RDI_{+6,3} = 61,8\%$ ), что объясняется отсутствием в первых брэксах какого-либо гематита и, напротив, присутствием в шламовых брэксах вторичного гематита (в частицах как доменных, так и конвертерных шламов),

Таблица 2. Компонентный состав шламовых и рудокислых брэксов

Компоненты брэксов	Массовая доля компонентов, %	
	брэкс 2	брэкс 4
Портландцемент ПЦ 500	9,1	9,0
Коксовая мелочь	–	13,5
Бентонит	–	0,9
Шлам доменный	54,5	–
Шлам конвертерный	36,4	–
Железорудный концентрат	–	76,6

кристаллическая решетка которого при низкотемпературном и медленном восстановлении перестраивается с увеличением геометрических параметров, что вызывает возникновение механических напряжений и дезинтеграцию кусков материала, содержащих гематит.

Для сопоставления одновременно оценили по тому же стандарту горячую прочность агломератов с основностью  $(CaO+MgO)/(Al_2O_3+SiO_2)$  1,2; 1,4 и 1,6, полученных из обычной для ПАО «НЛМК» шихты (табл. 3). Горячая прочность шламовых брэксов сопоставима с горячей прочностью агломерата с основностью 1,2 и 1,4 (64 и 60%), что объясняется близкими содержаниями в этих материалах вторичного гематита. Горячая прочность агломерата с основностью 1,6 (77%) выше горячей прочности шламового брэкса в связи с тем, что при основности 1,6 в агломерате уже появляется новая фаза – ферриты кальция, упрочняющая структуру агломерата и снижающая дезинтеграцию его при низкотемпературном восстановлении. Экспериментально установлено, что благодаря прочности цементной связки и отсутствию дезинтеграции рудных частиц при низкотемпературном восстановлении горячая прочность брэксов из магнетитового железорудного концентрата и коксовой мелочи (показатель  $RDI_{+6,3}$ ) зна-

Таблица 3. Результаты определения горячей прочности брэксов и агломератов различной основности

Окискованный материал	$RDI$ (+6.3), %
БРЭКС 4* (основность 0,75)	96,5
БРЭКС 2* (основность 1,93)	61,9
Агломерат основностью:	
1,2	64
1,4	60
1,6	77

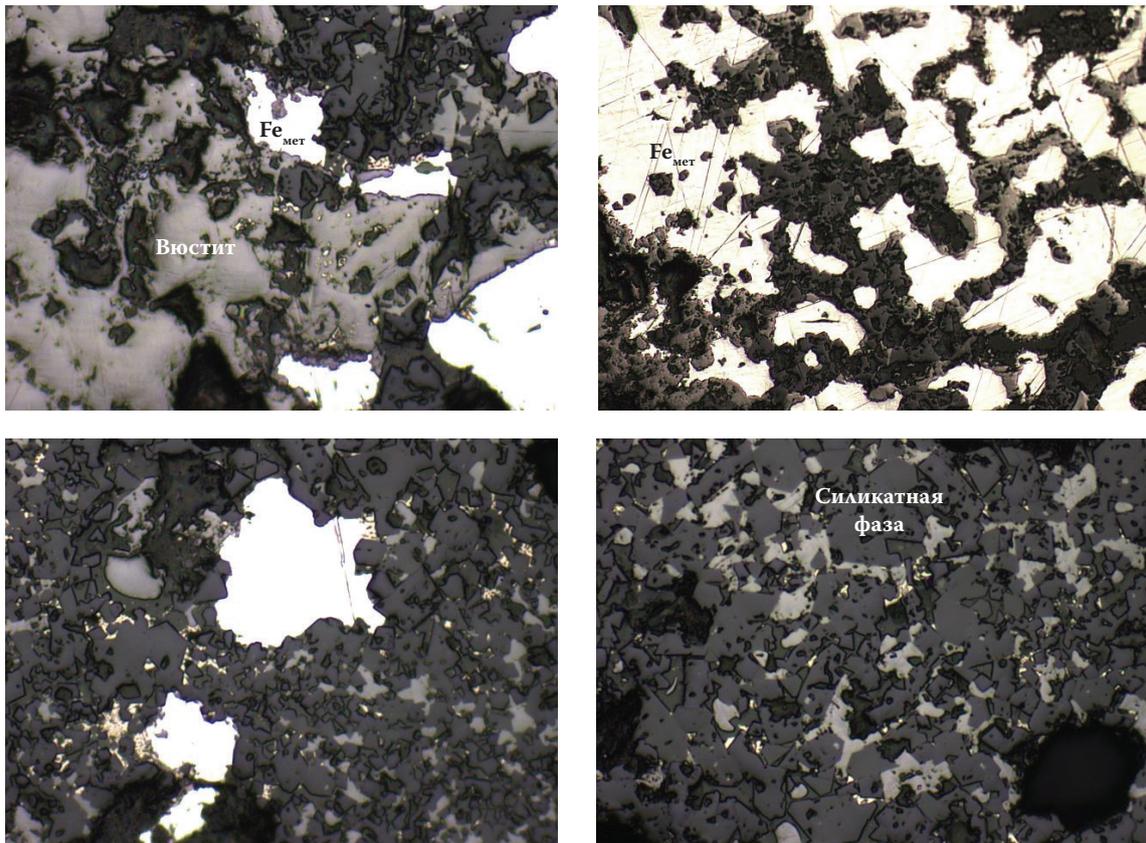


Рис. 1. Световая микроскопия брэкса после нагрева в восстановительной атмосфере при 1400 °С, ×200

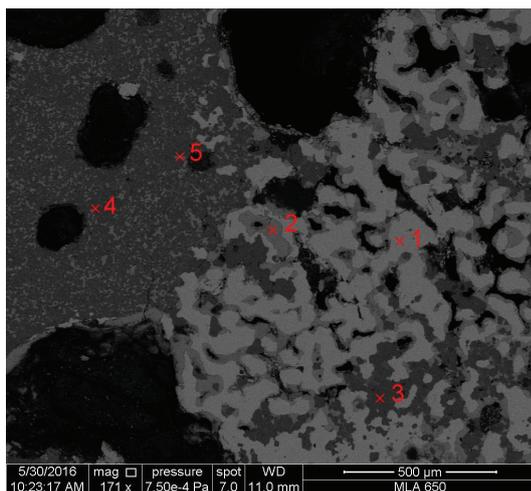


Рис. 2. Растровая микроскопия брэкса после восстановительного нагрева при 1400 °С:

1 – α-железо; 2 – вюстит; 3, 4 – стеклофаза; 5 – вюстит

чительно превышает горячую прочность агломератов с основностью (В4) 1,2; 1,4 и 1,6.

Качественно механизм горячей прочности иллюстрируется на рис. 1 и 2, где приведены структуры брэкса после восстановления при температуре 1400 °С, показывающие, что металлическое железо образует своеобразную сетку, внутри которой встречаются микрзоны вюstitа. Металл выделился из стеклофазы, раскристаллизованной до силикатов.

Таким образом, обеспечение горячей прочности брэкса после утраты связующей способности цементной связки достигается в результате образования (еще при газовом восстановлении) поверхностной металлической оболочки-каркаса и образования железосиликатной матрицы, из которой при температурах выше 1100 °С восстанавливается железо за счет углерода коксовой мелочи.

В начале 2021 г. были выполнены испытания металлургических свойств брикетов экструзии на основе железосодержащих пылей электрофильтров на цементной связке (8%) и с бентонитом в качестве пластификатора (0,8%). Независимой лабораторией (СС1, входящей в состав COTEGNA GROUP) выполнен комплекс исследований, включавший:

– определение относительной восстановимости по стандарту ISO 7215; проба подвергается воздействию смеси восстановительного газа, состоящего из CO (30%) и N<sub>2</sub> (70%) в течение 180 мин при температуре 900 °С; индекс конечной степени восстановления определяется по потере массы в процессе восстановления; расход восстановительного газа – 15 л/мин; крупность испытуемой пробы – диам. 19 мм, длина 19–120 мм;

– определение индекса свободного вспучивания по стандарту ISO 4698 (для окатышей); проба подвергается воздействию смеси восстановительного газа, состоящего из CO (30%) и N<sub>2</sub> (70%) в течение 60 мин при температуре 900 °С; индекс свободного набухания определяется как разность объемов пробы до и после восстановления; расход восстановительного газа – 15 л/мин; крупность испытуемой пробы – диам. 19 мм, длина 19–120 мм;

– определение показателей низкотемпературного восстановления – измельчения динамическим методом по стандарту ISO 13930; проба, находящаяся во вращающейся трубе, подвергается воздействию смеси восстановительного газа, состоящего из CO (20%), CO<sub>2</sub> (20%), H<sub>2</sub> (2%) и N<sub>2</sub> (58%) в течение 60 мин при температуре 500 °С; низкотемпературный индекс разрушаемости определяется в зависимости от класса крупности более 6,3 мм, менее 3,15 мм и менее 0,5 мм; расход восстановительного газа – 20 л/мин; крупность испытуемой пробы – диам. 19 мм, длина 19–120 мм.

Результаты проведенных измерений металлургических свойств приведены в табл. 4 и на рис. 3–6.

По официальному заключению компании CCI, результаты испытаний железосодержащих брикетов находятся в диапазоне значений, получаемых для проб железорудных окатышей и агломерата хорошего качества. Таким образом, и механическая прочность брэксов, и их горячая прочность обеспечивают достижение (и превышение) уровня аналогичных свойств агломерата. Практический и многолетний опыт эксплуатации ряда брикетных фабрик в составе доменных цехов (Россия, Япония, Индия, Чили и др.) подтверждают высокие металлургические свойства брэксов, достигаемые заметно меньшим, чем в альтернативных брикетных технологиях, содержанием связующего.

Таблица 4. Результаты независимых испытаний металлургических свойств брикетов

Наименование показателей	Нормативные документы	Результаты
Железо общее Fe, %	ISO 2597-1	47,61
Оксид железа двухвалентного Fe (II), %	ISO 9035	10,23
Конечная степень восстановления R <sub>180°</sub> , %	ISO 7215	88,8
Индекс свободного набухания FSI, %	ISO 4698	9,4
Низкотемпературный индекс разрушаемости:		
более 6,3 мм LTD <sub>+6,3</sub> , %	ISO 13930	86,1
менее 3,15 мм LTD <sub>-3,15</sub> , %		13,8
менее 0,5 мм LTD <sub>-0,5</sub> , %		13,6



Рис. 3. Внешний вид пробы перед испытаниями



Рис. 4. Внешний вид пробы после измерения относительной восстановимости (ISO 7215)



Рис. 5. Внешний вид пробы после испытания на вспучивание (ISO 4698)



Рис. 6. Внешний вид пробы после испытания на низкотемпературное восстановление – измельчение (ISO 13930)

С точки зрения сравнения производительности аглофабрик и брикетных фабрик следует признать несомненное превосходство аглофабрик по этому параметру. Тем не менее, уже накопленный логистический опыт крупномасштабных фабрик по производству брэксов свидетельствует о возможности достижения производительности уровня 2000–7000 т брэксов в сутки. Производительность агломерационной ленты составляет 1500–10000 т/сут; обжиговой машины – 2500–9000 т/сут. Крупнейший в мире завод по производству керамического кирпича – Саудовский завод Red Brick, работающий по технологии жесткой экструзии, – производит 1 млн шт. кирпича в день.

Агломерационный процесс осуществляется за счет горения твердого топлива в фильтруемом через слой железорудной шихты воздушном потоке. В результате протекания физико-химических процессов в агломерационном слое формируются эмиссии загрязняющих веществ:

- пылевые выбросы, обусловленные механическим выносом из слоя мелкодисперсной шихты или образованные в процессе разрушения материалов (агломерата при сходе с аглоленты, при охлаждении, дроблении и расसेве пирога агломерата после спекания);

- выбросы оксида углерода CO, которые ввиду особенностей горения распределенного твердого топлива в агломерационном слое (в связи с неполнотой горения), являются технологически оправданными;

- выбросы диоксида серы SO<sub>2</sub>, зависящие от содержания серы в коксовой мелочи и угля, которая используется в качестве топлива, а также от состава железорудной шихты;

- выбросы оксидов азота NO<sub>x</sub> от процесса горения в горелках зажигательного горна, частично горения твердого топлива, а также ввиду эмиссии «тепловых» оксидов азота, обусловленных содержанием азота в

коксовой мелочи и железорудных материалах.

Агломерация сопровождается значительным воздействием на окружающую среду. В структуре выбросов загрязняющих веществ интегрированного металлургического предприятия по всем наиболее существенным компонентам эмиссий (пыль, оксид углерода, диоксид серы, оксиды азота) агломерации принадлежат лидирующие позиции (табл. 5) [3].

В отличие от агломерационного процесса при окусковании методом жесткой вакуумной экструзии (диапазон давлений 1,5–3,5 МПа и выше, влажность смеси 12–16%) не требуется тепловая обработка сырых брикетов, что позволяет получать прочный материал (см. табл. 3) изометрической формы и размеров, пригодных для загрузки в доменную печь, выдерживающий штабелирование, многочисленные перегрузки и длительное хранение в условиях окружающей среды. Как и в случае безобжиговых окатышей, в шихту для производства брэксов обязательно вводят связующее, расход которого снижен по сравнению с производством безобжиговых окатышей [4], а в некоторых случаях (для отдельных шихт) в шихту для производства брэксов необходима добавка пластификатора.

Основными источниками воздействия на окружающую среду при производстве брэксов являются следующие (укрупненно):

- склад сырья (операции выгрузки шихтовых материалов, хранения и подачи в технологический процесс);

- отделение дозирования, смешивания, экструдирования;

- разгрузка брэксов, штабелирование и обработка штабеля (отсев мелкой фракции, отгрузка потребителям);

- система аспирации цехового пространства.

Приоритетным компонентом эмиссий в атмосферный воздух при производстве брэксов является неорганическая пыль. По оценке, удельная эмиссия неорганической пыли при производстве брэксов не превышает 0,05 кг/т.

Сравнение основных промышленных технологий окускования по критериям наилучших доступных технологий (НДТ) [5–

Таблица 5. Выбросы в атмосферу в основных производствах черной металлургии

Производство	Доля производства в общем объеме эмиссий компонента, %			
	пыль	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
Агломерация	31,1	77,8	61,0	26,0
Сталеплавильное	19,7	5,4	0,02	6,5
Огнеупорное	18,4	0,4	0,4	5,4
Доменное	17,3	3,5	0,3	3,0
Энергетическое (ТЭЦ-ПВС)	7,4	Нет данных	36,7	36,6
Коксохимическое	2,0	7,8	1,0	9,1
Прокатное	1,2	Нет данных	0,2	10,5
Ремонтное	1,0	4,9	0,02	1,5
Прочие	1,9	0,2	0,36	1,4
Итого:	100	100	100	100

6] представлено в табл. 6. Видно, что при сокращении производства агломерата половины высвобождающихся капитальных средств достаточно для строительства фабрики по производству брэксов.

Экструзионное окускование, вследствие отсутствия потребления энергоресурсов на высокотемпературную обработку сырых брэксов, отличается минимальными показателями воздействия на окружающую среду, что является ее несомненным конкурентным преимуществом. Таким образом представления о возможности эффективной частичной замены агломерата брэксами получают свое обоснование по перечисленным выше критериям (металлургические свойства, производительность оборудования и воздействие на окружающую среду).

При использовании в агломерации мелкодисперсных отходов (пылей и шламов) повторно затрачиваются дополнительные энергетические и материальные ресурсы. Далеко не все подобные материалы могут эффективно применяться в составе аглошихты, что приводит к постоянному увеличению отвалов (по сути, техногенных месторождений) на территории предприятий. В некоторых странах захоронение таких отходов запрещено, а в других разрешается только после их нейтрализации, требующей значительных затрат.

Колошниковая пыль представляет собой очень ценный материал, так как ее состав близок к составу доменной шихты. Однако из-за высокого содержания углерода и дисперсности колошниковая пыль плохо окомковывается. Плохая комкуемость материала сдерживала его применение при производстве агломерата. В настоящее время металлургами в той или иной степени решены проблемы использования колошниковой пыли в составе аглошихты, хотя ряд специалистов считают, что из-за плохой комкуемости значительная часть пыли не попадает в состав аглоспека, уносится с аглогазами и вновь переходит в шлам. Углерод колошниковой пыли в процессе спекания не работает. В то же время в составе брикета углерод колошниковой пыли эффективно используется для восстановления оксидов, что приводит к снижению расхода кокса.

Таблица 6. Характеристика различных технологий окускования по критериям наилучших доступных технологий (НДТ)

Критерий НДТ	Окускованное железорудное сырье		
	агломерат	окатыши	брэкссы
Минимальный уровень воздействия на окружающую среду, кг/т:			
пыль	≤1,2	≤0,6	0,05
оксиды азота	≤0,55	≤0,535	0
диоксид серы	≤4,0	≤0,5	0
оксид углерода	≤14,0	~0	0
Выбросы суммарно, кг/т	≤20,0	≤2,0	≤0,05
Потребление ресурсов:			
твердое топливо, кг/т	23,6–48,9	0	0
газообразное топливо, м <sup>3</sup> /т	2,45–6,3	9,5–15,0	0
электроэнергия, кВт·ч/т	23,0–48,7	29,0–48,5	15,0–33,0
Инвестиции, руб./т	≈5000	≈5500	≈2000
Период внедрения, годы	3	3	2
Внедрение (на одном и более предприятиях)	Да	Да	Да

Утилизация конвертерной пыли и шламов в качестве добавки при производстве агломерата также возможна, но не рациональна. Помимо существенного снижения производительности агломашин, связанного с ухудшением окомкования и газопроницаемости, в доменную печь поступает значительное количество щелочей и цинка, оказывающих негативное влияние на работу доменных печей. Использование техногенного сырья различного генезиса в аглошихте вследствие нестабильности его химического и гранулометрического составов без возможности дозирования на аглофабриках, не имеющих усреднительного склада, негативно отражается на стабильности состава и качестве агломерата.

Впервые концепция частичной замены агломерата брэксами была высказана в работе [7] в виде гипотезы о возможности достижения высоких значений доли брикетов в доменной шихте (вплоть до 100%). В настоящей работе концепция пересмотрена и получает свое развитие в виде утверждения о возможности и целесообразности достижения синергии агломерации и экструзионного брикетирования, достигаемой в результате 50%-го снижения производства агломерата, приводящего к двукратному снижению выбросов и к пропорциональному снижению доли агломерата в доменной шихте, компенсируемому добавлением брэксов из материалов, выводимых из аглопроцесса. Как следствие, возрастает прочность обновленной шихты (агломерат + брэкс), во-первых, вследствие использования более прочных

Таблица 7. Доля агломерата в шихте в зависимости от основности шлака\*

Основность агломерата	Основность шлака				
	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20
1,04	1,000	–	–	–	–
1,20	0,796	0,873	0,951	–	–
1,30	0,718*	0,790	0,860	0,930	1,000
1,40	0,648	0,710	0,773	0,836	0,899
1,50	0,591	0,648	0,705	0,762	0,819
1,60	0,544	0,596	0,648	0,700	0,753
1,70	0,503	0,551	0,599	0,647	0,696
1,80	0,469	0,514	0,558	0,604	0,649
1,90	0,438	0,480	0,522	0,564	0,606
2,00	0,411	0,450	0,490	0,529	0,569
2,10	0,388	0,425	0,462	0,499	0,537
2,20	0,367	0,402	0,437	0,472	0,507
2,30	0,348	0,381	0,414	0,447	0,481
2,40	0,331	0,362	0,394	0,425	0,457
2,50	0,315	0,345	0,375	0,405	0,436
2,60	0,301	0,330	0,358	0,387	0,416
2,70	0,289	0,316	0,343	0,371	0,398
2,80	0,277	0,303	0,329	0,356	0,382
2,90	0,266	0,291	0,316	0,341	0,367
3,00	0,256	0,280	0,304	0,328	0,353

\* Базовый вариант без брэксов, остальное (0,282) – окатыши; в вариантах с большей основностью доля окатышей ниже, в остальных сохранена, остаток – брэксы.

брэксов, во-вторых, из-за производства более прочного агломерата (без или с уменьшенной долей вторичных материалов более высокой основности). В итоге это приведет к снижению образования мелких фракций в агломерационном и доменном процессах.

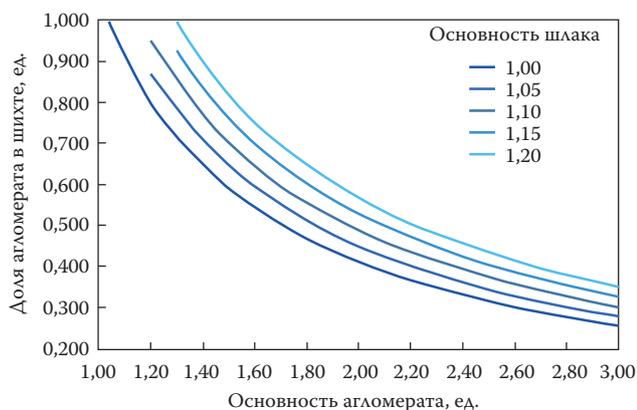


Рис. 7. Зависимость доли агломерата в доменной шихте от его основности и основности шлака

Таблица 8. Основность агломерата в зависимости от его доли в доменной шихте

Параметры работы при сохранении основности агломерата В=1,315	Расход брикетов, % железорудной смеси			
	0 (база)	10	20	30
Расход, кг/т чугуна				
Агломерат	1193	1037	879	719
Окатыши	443	449	450	454
Брикеты	0	165	332	503
Кокс (сух.скип.)	426	426	425	423
Известняк	0	40	60	80
Доломит	0	0	10	20
Корректировка основности агломерата				
Рекомендуемая основность агломерата для исключения сырого флюса из доменной плавки	1,32	1,53	1,79	2,21
Расход, кг/т чугуна		167,01	169,94	173,08
Агломерат	1193	1051	899	743
Окатыши	443	453	461	469
Брикеты	0	167	340	519
Кокс (сух. скип.)	426	417	409	401
Известняк	0	0	0	0
Доломит	0	0	0	0

**Примечания:** Основность шлака 0,99, доля окатышей в шихте 27,1%; степень использования газа и состав шлака стабильные. Состав брикетов: 80% смесь концентратов (Михайловский и Лебединский 3:1); 13% коксовая мелочь; 6% цемент; 1% бентонит.

Как следует из расчетов для условий одного из заводов (табл. 7), снижение доли агломерата в доменной шихте требует роста основности агломерата. Расчет проводился при условии стабильной доли офлюсованных окатышей и использования брэксов и при сохранении основности доменного шлака, а также исключения сырых флюсов из доменного процесса.

На рис. 7 показана графическая зависимость доли агломерата в шихте от его основности.

Из табл. 7 и рис. 7 видно, что при основности доменного шлака на уровне 1,00–1,10 характерного практически для всех доменных цехов России, снижение доли агломерата ниже 0,5 в шихте потребует его основности не ниже 1,7, а при доле ниже 0,3 – уже ближе к 3, т.е. «железофлюса».

Для величин доли агломерата в доменной шихте менее 50% основность агломерата показана в табл. 8.

В свою очередь, рост основности агломерата (выше минимальных значений 1,3–1,5 [8]) приво-

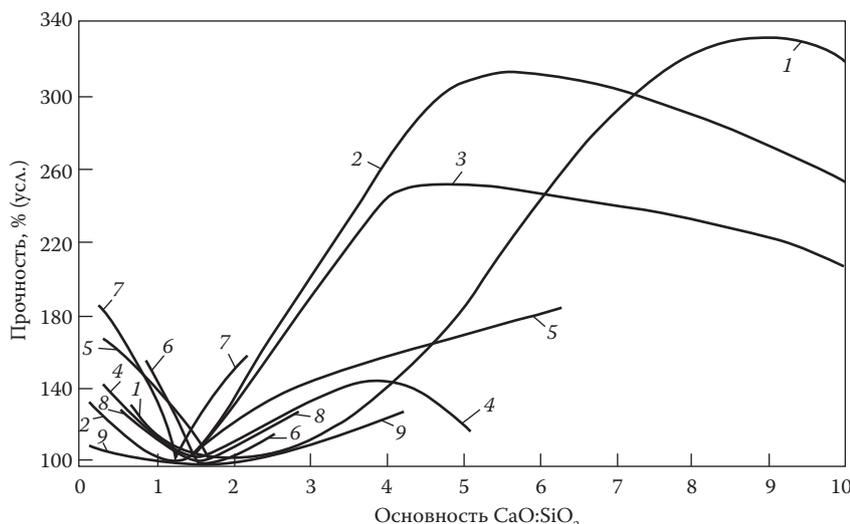


Рис. 8. Влияние основности агломерата на его прочность в зависимости от качества сырья [8]: 1–3 – тонкоизмельченный концентрат соответственно богатый, средний и бедный железом; 4 – смесь руд; 5 – смесь тонкого концентрата и пылеватых руд; 6 – магнетитовая руда; 7 – гематитовая руда; 8, 9 – смесь руд

дит, как известно, к росту его прочности практически для всех видов железных руд (рис. 8).

В соответствии с рис. 8 для условий расчетов, результаты которых приведены в табл. 7–8 и на рис. 7, замена 50% агломерата на брэксы с соответствующим увеличением основности агломерата приведет к росту его прочности (только за счет увеличения основности!) на 60–80%. Дополнительное увеличение прочности выводом из аглошихты пылей и шламов позволяет рассчитывать суммарно, как минимум, на двукратное увеличение прочности.

При использовании «кислых» окатышей агломерат изначально будет более основным, тем не менее, повышение его основности до уровня не ниже 2,0–2,5 также позволит использовать в доменной шихте брэксы, что обеспечит вывод из агломерации вторичных материалов.

Таким образом, сокращение доли агломерата в доменной шихте вдвое приведет (в дополнение к двукратному снижению вредных выбросов) к росту прочности производимого агломерата, что, в свою очередь, приведет к значительному (до минимума) снижению отсева в доменном цехе. Для старых цехов, где операция отсева агломерата отсутствует, это позволит свести к минимуму вредное воздействие этого фактора на показатели процесса (уменьшение содержания мелкой фракции 5–0 мм в железорудной шихте на каждый 1% приведет к снижению расход кокса на 0,5%, росту производительности на 1,0% [3]. Кроме того, будут происходить следующие изменения в аглошихте:

- выводятся из агломерации такие вторичные материалы, как колошниковая и аспирационная пыль, частично или полностью шламы;
- увеличивается расход известняка и доломита;
- увеличивается расход твердого топлива;
- увеличивается удельный расход железорудного концентрата при сокращении абсолютного расхода.

В доменном процессе в результате реализации концепции частичной замены агломерата брэксами ожидается:

- снижение расхода скипового агломерата при существенном росте прочностных характери-

стик;

- возможность увеличения доли окатышей в шихте;
- снижение удельного расхода кокса и рост производительности за счет уменьшения доли мелкой фракции.
- изменение массовой доли железа в зависимости от состава брэксов и доли компонентов шихты.

**Заключение.** В целом частичная замена в доменной шихте агломерата брэксами позволит улучшить качество агломерата как за счет необходимого увеличения основности, так и за счет возможного вывода вторичных материалов из аглошихты, суммарно приводя не только к сокращению расхода кокса и увеличению производительности доменной печи, но и снижению суммарных выбросов и воздействия на окружающую среду.

Возможность достижения высоких величин долей брикетов в доменной шихте показана в работах [9–12], посвященных анализу результатов опытно-промышленных плавок в ПАО НЛМК в 2003 г.

При проплавке опытной партии брикетов (2475 т) из смеси железорудного концентрата, коксовой мелочи и портландцемента (15% массы брикета) достигнут уровень расхода брикетов, превысивший 303 кг/т чугуна. Результаты плавок подтвердили, что такие брикеты являются полноценным самовосстанавливающимся компонентом доменной шихты, применение которого

обеспечивает снижение расхода кокса в доменной плавке, пропорциональное их расходу. Доля такого компонента в доменной шихте лишь незначительно ограничивается снижением производительности печи в результате снижения содержания железа в шихте и может достигать, по мнению авторов, 50% и более. Максимально достигнутое значение доли брикетов в рудной части шихты составило около 19%. Достижение такого уровня потребовало серьезного «разубоживания» шихты за счет использования 15% цемента. Для брикетов экструзии достижение требуемой горячей прочности обеспечивается 6–9% цемента. Дальнейшее сокращение расхода связующего, достигаемое при использовании полимерных связующих, будет способствовать росту степени технически осуществимой замены агломерата брэксами.

#### Библиографический список

1. Бижанов А.М., Загайнов С.А. Испытания брикетов на механическую прочность // Металлург. 2021. № 3. С. 11–18.
1. Курунов И.Ф., Бижанов А.М., Тихонов Д.Н., Мансурова Н.Р. Металлургические свойства брэксов // Металлург. 2012. № 6. С. 44–48.
3. Фролов Ю.А. Агломерация: технология, теплотехника, управление. М. : Металлургиздат, 2016. 672 с.
4. Лотош В.Е. Безобжиговое окучкование тонкодисперсных материалов и мелочи полезных ископаемых. Екатеринбург : ИД «Филантроп», 2009. 525 с.
5. ИТС НДТ 26 «Производство чугуна, стали и ферросплавов». Электронный ресурс: /www.burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail/
6. ИТС НДТ 25 «Добыча и обогащение железных руд». Электронный ресурс: /www.burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail/
7. Бижанов А.М., Курунов И.Ф. Брикетты экструзии (брэксы) – новый этап в окучковании сырья для черной металлургии. М. : ООО «Металлургиздат», 2017. 236 с.
8. Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С. Металлургия чугуна. М. : Металлургия, 2004. С. 184–204.
9. Курунов И.Ф., Щеглов Э.М., Кононов А.И., Большакова О.Г. и др. Исследование металлургических свойств брикетов из техногенного и природного сырья и оценка эффективности их применения в доменной плавке. Ч. 1 // Бюл. НТИЭИ «Черная металлургия». 2007. № 12. С. 39–48.
10. Курунов И.Ф., Щеглов Э.М., Кононов А.И., Большакова О.Г. и др. Исследование металлургических свойств брикетов из техногенного и природного сырья и оценка эффективности их применения в доменной плавке. Ч. 2 // Бюл. НТИЭИ «Черная металлургия». 2008. № 1. С. 8–16.
11. 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.
12. Курунов И.Ф., Большакова О.Г., Щеглов Э.М. и др. Опыт промывки горна доменных печей брикеттами из окалины // Металлург. 2007. № 6. С. 36–39.

## SYNERGY OF SINTERING AND BRIQUETTING IN THE BLAST FURNACE PROCESS.

© Bizhanov A.M., Christophe Aubertot

The article develops the concept of partial replacement of sinter in a blast furnace charge by extruded briquettes, which creates the basis for the synergy of sintering and briquetting. Criteria for the comparability of properties and production parameters for agglomerate and extrusion briquettes (brex) have been analyzed and the fundamental possibility of partial replacement of sinter with brex has been substantiated. Replacing 50% of the sinter in the blast-furnace charge, which means a proportional decrease in its production, will lead to a twofold decrease in the harmful emissions of the sinter plant and will lead to the production of a sinter of higher strength, dictated by the structure of the thus-renewed blast-furnace charge. At the sinter production stage, such a change will lead to a decrease in the total consumption of iron ore concentrate; to abandon the use of blast furnace and aspiration dusts in sinter batch with the output of such materials to briquetting; due to an increase in the quality of the sinter, the formation of fines will significantly decrease; the consumption of dolomite and limestone will increase; the consumption of solid fuel will increase. The blast furnace charge will undergo such changes as a decrease in the consumption of skip sinter and dry skip coke. The article presents also the results of calculating the options for partial replacement of the sinter with the proportion of sinter in the charge of 10.20 and 30%.

**Keywords:** sinter; pellets; extruded briquette (brex); synergy; partial replacement of sinter; blast furnace charge.