

БРИКЕТИРОВАНИЕ КОКСОВОЙ МЕЛОЧИ СПОСОБОМ ЖЕСТКОЙ ЭКСТРУЗИИ

Айтбер Махачевич Бижанов¹, канд. техн. наук (bizhanov@briquet-brex.ru)

¹ Университет науки и технологий «МИСИС», Москва, 119049. Россия

Аннотация. В работе приведены результаты брикетирования коксовой мелочи способом жесткой экструзии. Изучена возможность использования брикетов на основе коксовой мелочи в доменном, ферросплавном и коксохимическом производствах. Показана роль гранулометрического состава материала и влияние способа измельчения коксовой мелочи на прочность и поведение коксовых брикетов при приложении внешней нагрузки. Использование протирачного экструдера для измельчения коксовой мелочи перед брикетированием приводит к повышению роли вязкопластичного поведения брикетов при приложении разрушающего усилия. Дан обзор используемых в таком брикетировании органических и неорганических связующих материалов. Приведены результаты сопоставительных испытаний коксовых брикетов экструзии (брэкс) и валковых брикетов из коксовой мелочи на холодную и горячую прочность в барабанных пробах.

Ключевые слова: жесткая экструзия, брикетирование, коксовая мелочь, связующее, *CSR*, *CRI*

BRIQUETTING OF THE COKE FINES BY STIFF EXTRUSION

Aitber M. Bizhanov¹

¹ University of Science and Technology MISIS, Moscow. Russia

Annotation. The paper presents the results of briquetting coke breeze using the stiff extrusion method. The possibility of using briquettes based on coke breeze in blast furnace, ferroalloy and coke production has been studied. The role of the granulometric composition of the material and the influence of the method of grinding coke breeze on the strength and behavior of coke briquettes when an external load is applied is shown. Using a shearing extruder to grinding coke breeze before briquetting leads to an increase in the role of visco-plastic behavior of briquettes when applying a destructive force. An overview of the organic and inorganic binding materials used in such briquetting is given. The results of comparative tests of extruded coke briquettes (brex) and roll briquettes from coke breeze for cold and hot strength in tumble tests are presented.

Keywords: stiff extrusion, briquetting, coke breeze, binder, *CSR*, *CRI*

В процессе коксования углей образуется коксовая мелочь, коксовая пыль и другие дисперсные материалы [1]. Выход пыли в коксовом производстве колеблется в пределах 2–4 кг на 1 т кокса. При загрузке печей образуется ~0,4 кг пыли на 1 т, а при получении готового кокса 0,7–0,8 кг пыли на 1 т кокса. Химический состав пыли и мелочи соответствует составу кокса. Высокое содержание углерода и практически полное отсутствие летучих делает коксовую мелочь привлекательным материалом в восстановительных процессах доменного и ферросплавного производств как в качестве собственно восстановителя, так и в качестве компонента рудоуглеродных брикетов.

Для стабильной работы доменной печи очень важно использовать коксы с соответствующей реакционной способностью и высокой прочно-

стью. Реакционная способность и прочность кокса часто оцениваются по индексу реакционной способности (*CRI*) и прочности после реакции с CO_2 (*CSR*, ГОСТ Р 54250–2010). В стандартном методе испытаний *CRI* определяют путем воздействия на кокс чистого диоксида углерода при 1100 °С в течение 2 ч и последующего измерения потери веса. *CSR* определяют взвешиванием доли прореагировавшего кокса класса >10 мм после 600 оборотов в барабане.

По принятым на сегодня требованиям к показателям качества доменного кокса его реакционная способность *CRI* не должна превышать 30 %, а горячая прочность *CSR* должна составлять ≥60 % [2, 3]. Величина показателя *CSR* предопределена величиной *CRI*, так как в соответствии с ГОСТ Р 50921–2005 для определения *CSR* в барабан загружают весь остаток пробы кокса после газифика-

ции. Эти показатели обладают обратной зависимостью, которую можно выразить формулой $CSR = 100 - CRI$.

В приложении к доменному производству коксовые брикеты не рассматриваются в качестве полноценной альтернативы кусковому коксу, поскольку достигнутые на сегодня наилучшие уровни величин реакционной способности *CRI* и прочности после реакции *CSR* для таких брикетов не соответствуют требованиям, предъявляемым доменщиками. К примеру, показатели *CSR* и *CRI* промышленно производимых компанией US Steel коксовых брикетов в Кошице (Словакия) составляют соответственно 1,1 и 60 %, что не позволяет применять такие брикеты в качестве альтернативы доменному коксу.

Заметим, что условия реакции стандартных испытаний отличаются от реальных условий поведения кокса в доменных печах. Первоначально фактическая температура реакции в доменном процессе находится в пределах от 800 до 1400 °С. Во-вторых, реакционный газ CO_2 не является чистым и его состав меняется при продвижении кокса вниз по доменной печи. Не говоря уже о продолжительности процесса, превышающей 2 ч. Достоверность подхода к оценке качества доменного кокса на основе параметров *CRI/CSR* продолжает быть предметом спора.

Электропечной кокс требует более высокой реакционной способности, меньшей прочности и надлежащего удельного электрического сопротивления. Выбор величин *CRI* и *CSR* коксовых брикетов для выплавки ферросплавов предполагает поиск компромисса между стремлением обеспечить протекание реакции образования CO , а, следовательно, и высокую реакционную способность при низких величинах *CSR* и, с другой стороны, воспользоваться преимуществами электрической проводимости коксового слоя, обеспечивающего электрический контакт электродов и слоя шихты [4]. Использование менее реакционно-способного кокса способствовало бы поддержанию такого коксового слоя. Известно, что кокс меньшего размера и более реакционно-способный имеет более высокое удельное сопротивление [5].

Кроме того, требования к прочности коксовых брикетов на сжатие для руднотермических печей являются заметно менее жесткими по сравнению с требованиями к прочности доменного кокса вследствие значительно меньшей величины высоты слоя шихты. Очевидно можно предположить, что и величины *CSR* для ферросплавных коксовых брикетов также будут ниже требуемых доменным переделом.

Еще одним перспективным способом использования брикетов на основе коксовой мелочи является так называемое частичное брикетирование шихты для коксования. В работе [6] описан опыт такого брикетирования с использованием двух видов связующего: порошкообразной органической связки (ОС) в виде низкосортной муки и мелассы (М) – побочного продукта сахарного производства. Оптимальное количество связующего 4–5 %. Шихту перед брикетированием нагревали до 65–70 °С для придания ей пластичности, снижавшей энергетические затраты на окускование. Кроме того, коксовым брикетам на ОС требовалась и термическая сушка при 150–200 °С, а брикетам на мелассе – при температуре 250–400 °С. Были получены следующие величины прочности на сбрасывание при испытании по ГОСТ 25471–82 (высота 2 м, три сброса, 15 кг): для брикетов на ОС доля класса >5 мм составляла 99,1 %; для брикетов на мелассе – 97,8 %.

Сложности, возникающие при брикетировании коксовой мелочи, связаны с особенностями ее свойств, в первую очередь, с гидрофобностью, прямо или косвенно ограничивающей возможность использования традиционного брикетного оборудования. В этой связи основные усилия разработчиков брикетных технологий были направлены на поиск эффективных связующих материалов. Среди известных в литературе связующих для брикетирования коксовой мелочи – цемент, меласса, каменноугольный пек, лигносульфонаты, акрилонитрильные полимеры, поливинилацетат [7–10].

В работе [11] сообщалось о повышении прочности брикетов, полученных из коксовой мелочи в результате использования нового органического связующего. Было установлено повышение прочности брикетов из коксовой мелочи крупностью <1 мм в смеси с 8 % связующего. Однако технологический процесс при этом требовал упрочняющего обжига при 900 °С. В работе [12] приведены результаты исследования атактического полипропилена, нового связующего для брикетирования порошкообразного бурого угля, в приложении к брикетированию коксовой мелочи.

В частности, сообщалось об использовании метода привитой сополимеризации для модификации физических и химических свойств природного полимера, направленного на повышение эффективности связующего на его основе. Прививка природных полисахаридов подходящим синтетическим полимером обеспечивает требуемый уровень свойств как природного, так и синтетическо-

го полимера [13, 14]. Прививка полиакриламидных цепей на полисахаридную матрицу значительно повышает термическую и сдвиговую стабильность полимера. Крахмал является предпочтительным природным полимером из-за его широкой доступности и относительно невысокой стоимости. Эти привитые полимеры при взаимодействии с неорганическими функциональными материалами образуют трехмерную сетку гидрогеля посредством сшивания.

В работе [15] изучали наноккомпозит, сформированный на основе крахмал-привитого полиакриламида и бентонита с использованием только акриламида в качестве мономера с введением бентонита в систему. Разработанное вяжущее исследовано для применения в брикетах коксовой мелочи для определения возможности достижения высоких величин прочности на сжатие и термостойкости. Синтез связующего в лаборатории сводился к следующей последовательности операций. В колбы, содержащие ~100 мл воды, добавляли ~2 г крахмала. Температуру реакции поддерживали на уровне 70 °С в атмосфере азота на протяжении всего процесса. Примерно через 10 мин к гомогенному раствору крахмала добавляли ~10 г акриламида и перемешивали в течение ~30 мин. Таким образом, соотношение реагентов крахмал/акриламид принимали равным ~1:5. После этого к указанной выше реакционной смеси добавляли около 0,025 г персульфата калия и перемешивали в течение ~10 мин.

В качестве инициатора полимеризации использовали персульфат калия, а механизм прививки соответствует принципу, который описан в литературе [16]. Появление вязкого гелевого образования свидетельствовало о начале реакции полимеризации. В пробирку набирали ~0,5 г бентонита, диспергировали примерно в 10 мл воды и добавляли по каплям для равномерного распределения по матрице. Колбу нагревали до температуры ~70 °С в течение 1,5 ч. После охлаждения до комнатной температуры (15–35 °С) вязкий гелеобразный материал промывали ацетоном. Полученный плотный полимер разрезали на кусочки и выдерживали в печи при температуре ~60 °С для сушки в течение 8 ч.

Испытания коксовых брикетов на основе полученного таким способом связующего на прочность при сжатии показало возможность достижения высоких величин такой прочности (более 900 кгс на брикет). Однако при этом не обеспечивалась термостойкость брикетов.

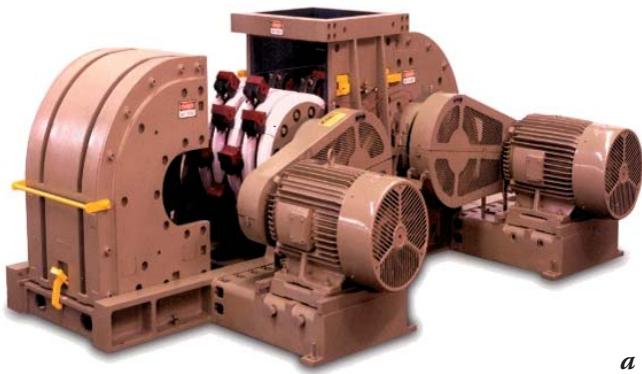
В работе [15] термостойкость коксовых брикетов для применения при выплавке феррохрома обеспечивалась при использовании синтети-

ческого наноккомпозита SGPBH (гибрид на основе крахмала-привитого полиакриламида и бентонита) следующего состава: бентонит 4 %, цемент 4 % и 2 % привитого полиакриламида. Доля такого связующего в массе брикета – 10 %. Брикетты изготавливали в гидравлическом прессе. Брикетты далее сушили в печи при 100 °С в течение 4 ч. После этого сырые брикетты упрочнялись при температуре окружающей среды в течение ~72 ч. Сообщалось, что при использовании такого комбинированного связующего обеспечивается термостойкость коксовых брикетов (при 1100 °С). Тем не менее, важные вопросы, касающиеся реакционной способности, прочности брикетов после реакции и электрической проводимости брикетов, в работе не затронуты. Экономическую эффективность применения сложного и относительно дорогого связующего не анализировали.

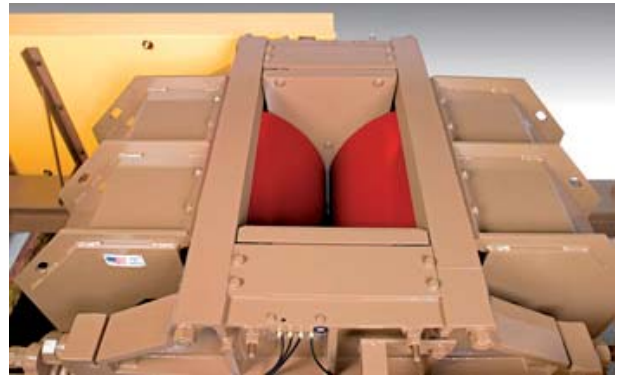
С 2023 г. компания Jianjie Group поставляет на рынок комбинированное связующее для брикетирования коксовой мелочи на основе предварительно желатинизированного крахмала [17]. Компания является крупнейшим производителем связующих материалов в КНР (четыре фабрики, суммарное производство более 300 тыс. т в год). Брикетты из коксовой мелочи на связующем компании Jianjie производятся промышленно на вибропрессовальной линии и используются в ваграночном производстве. Испытания на прочность после нагрева до 1200 °С подтвердили отличное соответствие требованиям литейного производства.

Первый опыт использования жесткой вакуумной экструзии для брикетирования коксовой мелочи был описан в работе [18]. Напомним, что жесткой является по определению экструзия брикетируемой смеси с влажностью 12–16 % при давлении в рабочей камере экструдера от 2 до 4 МПа. Были изготовлены коксовые брикетты экструзии (брэкссы) на цементно-бентонитовом связующем. Составы брэкссов, изготовленных с помощью лабораторного компьютеризированного экструдерного комплекса: 94,5 % коксовой мелочи; 5 % цемента; 0,5 % бентонита.

Было изучено влияние способа измельчения шихты на прочность брэкссов одинакового состава, произведенных из одной и той же партии коксовой мелочи, но с применением различных способов ее измельчения – молотковой мельницей, валковой дробилкой и двойным продавливанием через растирающую пластину в протирающем экструдере. Внешний вид растирающей пластины и упомянутых видов оборудования приведен на рис. 1.



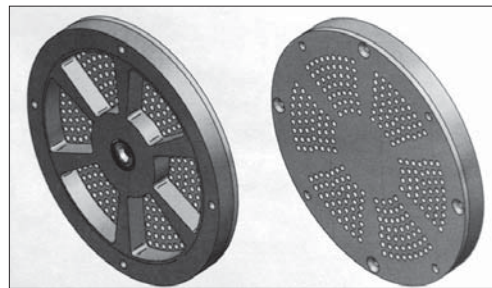
а



б



в



г

Р и с. 1. Оборудование и средства для измельчения материалов для жесткой экструзии:

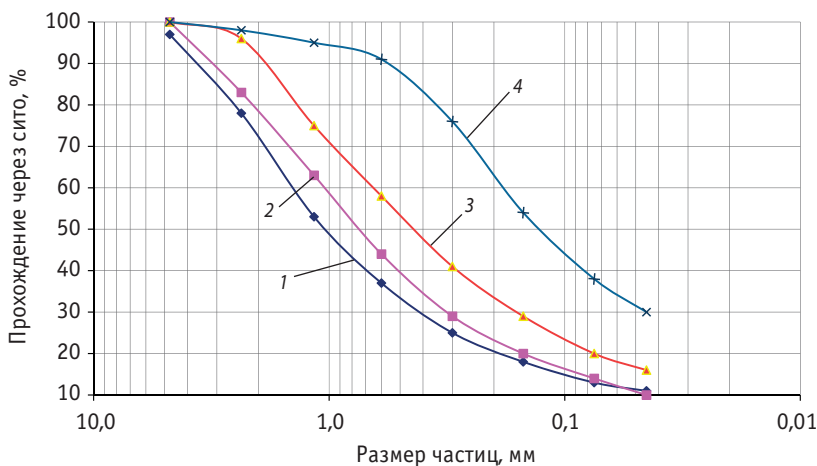
а – молотковая мельница Steele; б – валковая дробилка Steele; в – продавливание через растирающую пластину; г – растирающие пластины

Табл и ца 1. Гранулометрический состав коксовой мелочи при различных вариантах обработки, %

Вариант обработки	Номер сита							
	4	8	16	30	50	100	200	325
	отверстие, мм							
	4,75	2,36	1,16	0,60	0,30	0,15	0,075	0,045
Исходный материал	97	78	53	37	25	18	13	11
Молотковая мельница	100	83	63	44	29	20	14	10
Валковая дробилка	100	96	75	58	41	29	20	16
Двойное продавливание	100	98	95	91	76	54	38	30

Результаты гранулометрического анализа различным образом измельченной коксовой мелочи приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Видно, что наибольшую степень измельчения коксовой мелочи обеспечило двойное продавливание через протирочную пластину в экструдере. Эффект глубокого измельчения достигается в этом случае за счет приложения высоких сдви-



Р и с. 2. Гранулометрический состав коксовой мелочи при различных вариантах обработки:

1 – исходный материал; 2 – молотковая мельница; 3 – валковая дробилка; 4 – двойное продавливание

Таблица 2. Параметры экструзии и физические свойства брэксов из коксовой мелочи

Номер образца брэкса (способ измельчения)	Влажность, %	Вакуум, мм. рт. ст.	Температура, °С	Плотность, г/см ³	Прочность на сжатие, кгс/см ²
1 (валковая дробилка)	16,5	15,24	30,56	1,630	37,76
2 (двойное продавливание)	16,7	17,78	33,33	1,674	34,32
3 (молотковая мельница)	16,6	81,28	55,56	1,627	20,25

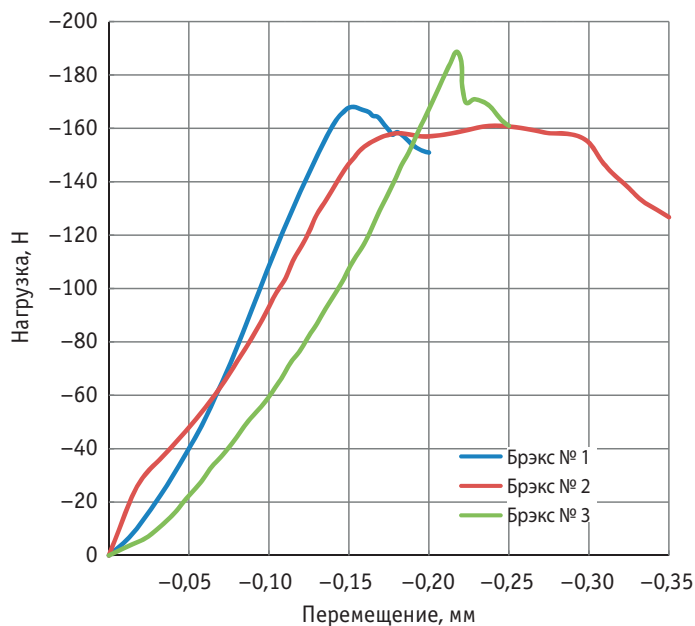
говых напряжений. Использование молотковой мельницы для такого материала оказалось малоэффективным и, в итоге, гранулометрический состав молотого материала отличался от гранулометрического состава исходной коксовой мелочи незначительно.

Параметры экструзии и физические свойства полученных брэксов (усредненные по нескольким образцам) приведены в табл. 2.

Различие в величинах прочности на сжатие брэксов № 1 и 2 незначительное и может свидетельствовать лишь о более раннем начале развития трещинообразования в брэксе № 2. Из приведенных данных также видно, что плотность брэкса из смеси, подвергнутой двойному продавливанию, оказалась на 2,5 % выше плотности брэксов из измельченной и продробленной коксовой мелочи. Очевидно, что плотная упаковка частиц брэкса № 2 стала следствием более высокой степени измельчения материала. В этом случае не наблюдалось обезвоживания смеси при экструзии, в отличие от брэксов № 1 и 3.

Далее образцы брэксов были испытаны на прочность на растяжение при раскалывании на настольной одноколонной электромеханической испытательной машине Instron 3345 с нагружающей способностью 5 кН. На рис. 3 приведены результаты испытания специально подготовленных образцов брэксов (диам. 25 мм, высота 20 мм, форма цилиндрическая).

Видно, что при примерно одинаковой несущей способности, брэксы по-разному реагировали на внешнюю нагрузку. Разница в величине максимальной нагрузки может быть связана с дефектами образцов. Однако различие в характере поведения имеет принципиально иные причины. Брэксы № 2 продемонстрировали вязко-пластичный характер разрушения, о чем свидетельствует наличие «площадки текучести» – горизонтальная составляющая кривой (см. рис. 3). Следовательно, для брэкса № 2 можно ожидать большей ударной прочности. При данном типе нагрузок локальные зоны разрушения в таком брэксе не будут приводить к полному разрушению образца и образованию мелочи. Для брэксов № 1 и 3 по-



Р и с. 3. График «нагрузка–перемещение» при испытании брэксов на прочность на растяжение при раскалывании

сле инициализации трещины происходит заметное падение кривой «сила–перемещение», что свидетельствует о хрупком характере разрушения образцов. Увеличение ударной прочности окускованного продукта способно существенно упростить и, следовательно, удешевить логистику его доставки до места использования, в том числе, отдаленного. Для практики жесткой экструзии важно, что указанного эффекта изменения типа поведения брэкса при внешнем механическом воздействии удалось достичь с использованием того же самого оборудования, которое применяется для окускования.

Были выполнены испытания полученных брэксов в барабанной пробе. В результате такой нагрузки исходный размер брэксов уменьшился в 3–4 раза с образованием незначительного количества мелких фракций (рис. 4).

Проведенные независимой лабораторией испытания горячей прочности коксовых брэксов дали следующие показатели: $CSR = 20 \%$, $CRI = 45,6 \%$. Видно, что по параметру CSR эти брэксы заметно



Р и с. 4. Коксовые брэксы до (а) и после (б) барабанных испытаний

превосходят упомянутые выше коксовые брикеты, производимые в Кошице. Очевидно, что такие коксовые брэксы вполне могут заменять коксовый орешек в доменных печах при их количестве в шихте не менее 15–25 кг/т чугуна. Возможно также их применение и в качестве восстановителя в рудотермических печах.

На следующем этапе изучения применимости жесткой экструзии для окускования коксовой мелочи были изготовлены экспериментальные коксовые брэксы на различных связующих материалах в качестве компонентов шихт для коксования. Частичное брикетирование части шихты позволяет увеличить начальную плотность загрузки, высокую плотность контактов между зернами, что позволяет обеспечить хорошее спекание угольных шихт с участием 20–25 % слабоспекающихся недефицитных углей. Хорошее спекание гарантирует высокое качество металлургического кокса [19–21]. Частичное брикетирование шихты для коксования получило широкое распространение, в частности, в Японии. Суммарная производительность

пяти установок частичного брикетирования превышает 13 тыс. т/сут. В качестве связующего при брикетировании используют каменноугольный пек, а на некоторых установках – высокотемпературный нефтяной пек, получаемый термическим крекингом кубовых остатков вакуумной дистилляции нефти.

Подобная промышленная установка пропускной способностью 1 млн т/год сырья была введена в действие фирмой «Сумитомо киндзоку коге» в феврале 1976 г. в Содегауре (префектура Тиба). На установке вырабатывается 300 тыс. т в год высокотемпературного нефтяного пека и 650 млн т в год малосернистого жидкого топлива для металлургических заводов.

В качестве связующих для получения коксовых брэксов были использованы крахмал (3 %), каменноугольная смола (5 %), бентонит (1 %) и высокомолекулярный флокулянт на основе полиакриламида (Praestol, 3 %).

Лабораторный смеситель Nobart использовали для подготовки увлажненной смеси и моделиро-



Р и с. 5. Исходные коксовые брэксы (а) и после испытаний на прочность при сбрасывании (б)

вания ее обработки в открытой части глиномялки. Лабораторный экструдер адекватно имитирует обработку материала в глиномялке с вакуумным затвором, продавливание смеси в вакуумированный рабочий объем экструдера и затем окончательную экструзию брэксов.

Все испытуемые образцы были экструдированы с использованием круглых фильер с несколькими отверстиями диам. 12 мм либо с одним отверстием диам. 25 мм. Экструдирование коксовой мелочи с использованием в качестве пластификаторов смолы и крахмала было затруднено вследствие низкой пластичности материала. Использование бентонита (1 %) позволило получить удовлетворительное качество брэксов. Наилучшее качество экструдирования было достигнуто с использованием 3 % пластификатора Praestol.

Полученные брэксы спустя 48 ч. вылеживания при комнатной температуре были испытаны на прочность при 10-кратном сбрасывании с высоты 1 м. Образование мелочи (<4,75 мм) не превысило 3 % (рис. 5).

На заключительном этапе исследований было проведено сопоставление качества коксовых брэксов и валковых брикетов одинакового состава, сделанных из одного и того же материала. Состав брэксов и валковых брикетов, %: 88 коксовая мелочь; 8 цемент; 4 бентонит. Такое чрезмерное количество связующего материала в брэксе было продиктовано необходимостью обеспечить корректность сопоставления прочностных свойств с валковыми брикетами. Такая комбинация связующих материалов используется в промышленном производстве коксовых валковых брикетов компании, предложившей провести сопоставление. Как показано выше, достижение приемлемых величин механической прочности коксового брэкса потребовало использования всего 6 % цементного связующего. Сопоставительные горячие и холодные барабанные пробы брэксов и валковых брикетов показали следующие значения: холодная проба (доля фракции <6,3 мм) – брэксы 75 %, брикеты 63,6 %; горячая проба (доля фракции >3,15 мм) – брэксы 74 %, брикеты 71 %.

В связи с экструзионным брикетированием коксовой мелочи необходимо особо отметить значительный практический опыт автора в использовании этого материала в составе рудоуглеродных доменных брэксов. Коксовая мелочь используется в качестве компонента доменных брэксов, изготавливаемых брикетной фабрикой производительностью более 1 млн т в год в Японии [22, 23]. Опыт более чем десятилетнего применения рудоуглеродных брэксов в составе доменной шихты показал, что в силу эффекта самовосстановления

таких брэксов достигается снижение суммарного расхода топлива в доменном процессе.

Заключение

Таким образом, технология жесткой экструзии позволяет эффективно готовить коксовую мелочь к брикетированию путем ее продавливания через протирочную фильеру экструдера либо брикетировать смесь без предварительного измельчения с использованием пластифицирующих добавок. Использование протирочного экструдера для подготовки коксовой мелочи к брикетированию позволяет увеличивать ударную прочность брэксов.

Эффективное брикетирование коксовой мелочи способом жесткой экструзии может осуществляться с применением традиционных органических и комбинированных связующих материалов. Снижение расхода связующих за счет использования полимерных материалов целесообразно при достижении баланса между дополнительными затратами на такие материалы и выигрышем в металлургических свойствах брикетов.

Уровни величин параметров реакционной способности (*CRI*) и прочности после реакции с CO_2 (*CSR*) коксовых брэксов позволяют рассматривать их в качестве полноценной замены коксовому орешку в доменном и ферросплавном производствах.

Жесткая экструзия может эффективно применяться для частичного брикетирования шихты для коксования. По механической и горячей прочности коксовые брэксы превосходят валковые брикеты аналогичного компонентного состава. Высокий потенциал эффективности коксовой мелочи реализуется при ее использовании в составе рудоуглеродных доменных брикетов.

Список источников

1. Бижанов А. М. Теория и практика брикетирования в металлургии. М. : Инфра-Инжиниринг, 2024. 516 с.
2. Филатов С. В., Курунов И. Ф., Ворсина Д. В., Тихонов Д. Н. Качество кокса и технология доменной плавки // Бюл. НТИЭИ. Черная металлургия. 2016. № 9. С. 48–50.
3. Кушнарев А. В., Киричков А. А., Беркутов Н. А. и др. Оптимизация угольной базы коксования ОАО НТМК для достижения мирового уровня показателей *CSR* и *CRI* кокса // Сталь. 2007. № 11. С. 54–58.
4. Pistorius P. C. Reductant selection in ferro-alloy production: The case for the importance of dissolution in metal // J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 2002. Vol. 200. P. 33–36.
5. De Waal A., Barker I. J., Rennie M. S. et al. Electrical factors affecting the economic optimization of submerged-

arc furnaces. INFACON 6. Proceedings of the 6th International Ferroalloys Congress, Cape Town. Johannesburg // The South African Institute of Mining and Metallurgy. 1992. Vol. 1. P. 247–252.

6. Носков В. А. Разработка технологии производства коксовых брикетов на ОАО «Баглейкокс» // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2005. С. 108–110.

7. Benk A., Coban A. Molasses and air blown coal tar pitch binders for the production of metallurgical quality formed coke from anthracite fines or coke breeze // *Fuel Process Technol.* 2011. Vol. 92 (5). P. 1078–1086. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.01.002>

8. Benk A. Utilisation of the binders prepared from coal tar pitch and phenolic resins for the production metallurgical quality briquettes from coke breeze and the study of their high temperature carbonization behavior // *Fuel Process Technol.* 2010. Vol. 91 (9). P. 1152–1161. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.03.030>

9. Blesa M.J., Miranda J.L., Izquierdo M.T. et al. Curing temperature effect on mechanical strength of smokeless fuel briquettes prepared with humates // *Energy Fuels*. 2003. Vol. 17 (2). P. 419–423. <https://doi.org/10.1021/ef-f20156f>

10. Pat. 5244473A US. Process for making moisture resistant briquettes / Sardesai Kashinath. 1992.

11. Масгутов И. И., Страхов В. М., Аникин А. Е. Повышение механической прочности брикетов, полученных на основе коксовой мелочи // *Кокс и химия*. 2013. № 9. С. 46–51.

12. Kural O., Savasci T., Eskikaya S. APP, a new binder for briquetting lignites // *Fuel*. 1989. Vol. 8. P. 404–407

13. Biswal D. R., Singh R. P. Characterization of carboxymethyl cellulose and polyacrylamide graft copolymer // *Carbohydr. Polym.* 2004. Vol. 57. P. 379–387. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.04.020>

14. Pandey S., Mishra S. B. Graft copolymerization of ethylacrylate onto xanthan gum, using potassium peroxydisulfate as an initiator // *Int. J. Biol. Macromol.* 2011. Vol. 49 (4). P. 527–535. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2011.06.005>

15. Kumar Patra S., Ghorai S., Sahu N. et al. Synthesis of Bio-Polymer Based Composite Binder for Utilization of Industrial Coke Dust Waste // *Fuel*. 2022. Vol. 311. P. 122502.

16. Kumar D., Pandey J., Raj V., Kumar P. A Review on the Modification of Polysaccharide Through Graft Copolymerization for Various Potential Applications // *Open. Med. Chem. J.* 2017. Vol. 11 (1). P. 109–126. <https://doi.org/10.2174/1874104501711010109>

17. <https://www.jianjiebinder.com/> [Электронный ресурс] (дата обращения 06.10.2023).

18. Бижанов А. М., Курунов И. Ф., Дашевский В. Я. О механической прочности брикетов экструзии. II // *Металлы*. 2015. № 3. С. 3–10.

19. Васильев Ю. С., Дюканов А. Г., Кафтан Ю. С. и др. Промышленная проверка эффективности способа частичного брикетирования шихты со связующим // *Кокс и химия*. 1985. № 6. С. 10–14.

20. Еремин А. Я. Каменноугольные связующие в технологии подготовки и коксования частично брикетированных угольных шихт : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1987. 23 с.

21. Кошкарлов Е. В. Разработка способов применения остаточных продуктов нефтепереработки в производстве металлургического кокса: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1987. 20 с.

22. Bizhanov A. Briquetting in Metallurgy. CRC Press, 2022. 326 p.

23. Бижанов А. М., Загайнов С. А. Использование рудоугольных брикетов в доменных печах // *Металлург*. 2022. № 7. С. 17–22.

*Статья поступила в редакцию 15.01.2024;
одобрена после рецензирования 09.02.2024;
принята к публикации 22.02.2024*