

УДК 669.168:622.788

О МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ БРИКЕТОВ ЭКСТРУЗИИ (БРЭКСОВ) ДЛЯ ДОМЕННОГО И ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВ. II. ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОКСОВОЙ МЕЛОЧИ НА ПРОЧНОСТЬ БРИКЕТОВ ЭКСТРУЗИИ

©2015 г. А.М. Бижанов^{1*}, И.Ф. Курунов^{2*}, В.Я. Дашевский^{3*}

^{1*}*Представительство фирмы J.C. Steele&Sons, Inc. USA, Statesville, NC в России*
E-mail: abizhanov@jsteele.com

^{2*}*ОАО Новолипецкий металлургический комбинат, Липецк*

^{3*}*ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва*
E-mail: vdashv@imet.ac.ru

Поступила в редакцию 15 июля 2014 г.

Изучено влияние способа измельчения коксовой мелочи на прочность и поведение брикетов экструзии (брэкс) при статической нагрузке. Установлено, что размер, форма и рельеф поверхности частиц коксовой мелочи влияют на характер разрушения брэкса. Применение для ее предварительного измельчения протирочного экструдера может способствовать проявлению вязкопластичного характера разрушения брэкса вследствие повышения его ударной прочности.

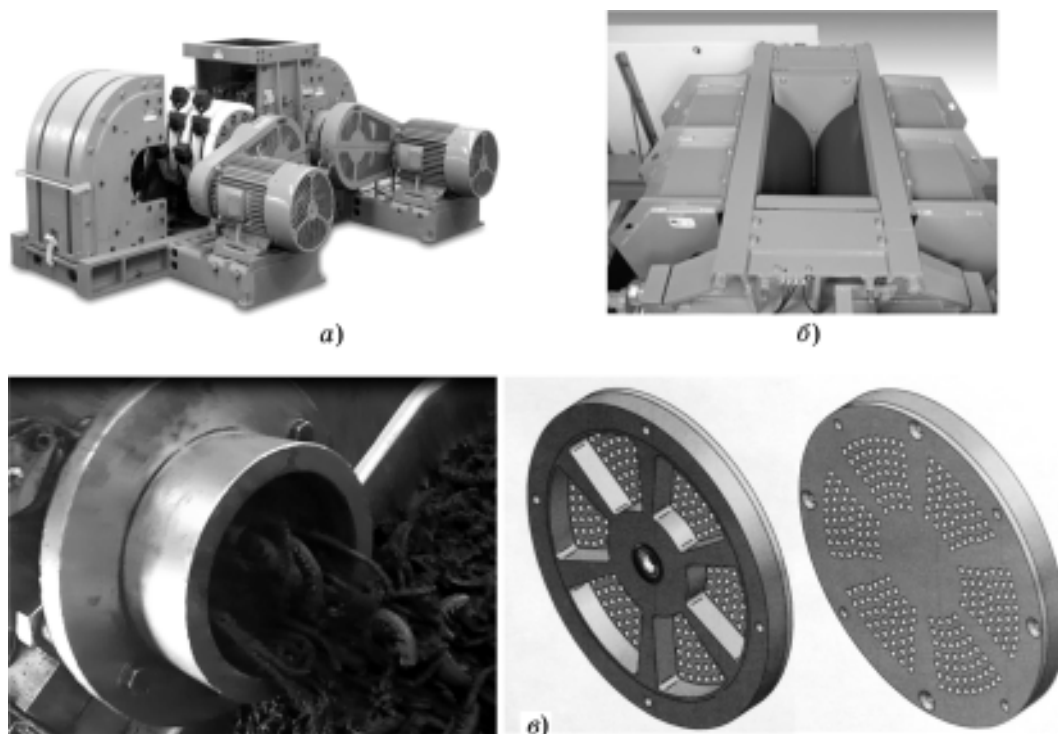
Ключевые слова: брикет экструзии (брэкс); жесткая вакуумная экструзия; механическая прочность; бентонит; пластичное разрушение; гранулометрический состав; форма частиц.

При выплавке чугуна и ферросплавов в доменных и рудно-термических печах в качестве восстановителя используют кокс. Для обеспечения нормального протекания процессов плавки размер кусков кокса в доменной печи должен превышать 20—25 мм, а в рудно-термической печи — 5—10 мм. Более мелкие фракции кокса отсеивают при подготовке шихты к плавке. Мелкие фракции кокса могут быть возвращены в производственный процесс путем их окускования после соответствующей подготовки.

Практика окускования дисперсных природных и техногенных материалов способом брикетирования получила широкое распространение в металлургии. Жесткая вакуумная экструзия — высокопроизводительная и экономичная технология окускования природных и техногенных материалов, используемых в металлургии, переживает в настоящее время этап роста. Особенности этой брикетной технологии, обусловившие большой к ней интерес практически во всех отраслях черной металлургии, описаны нами ранее [1—3].

В ряде случаев для придания брикетируемой шихте требуемой для экструзии пластичности необходимо изменение гранулометрического состава исходного материала (дробление, измельчение и др.). Способ осуществления такой обработки может сильно повлиять на величину прочности брикета экструзии (брэкса), его реакцию на механические воздействия в виде статических или ударных нагрузок и на характер разрушения. Для практики брикетирования важно понимание связи гранулометрического состава и особенностей геометрии частиц материала брэкса. Это иллюстрируется результатами нашего исследования влияния способа измельчения шихты на прочность брэксов одинакового состава, выполненных из одной и той же партии сырья (коксовая мелочь), но с применением разных способов измельчения.

Материалы и методика исследования. Для изучения влияния способа измельчения материала, изменения его гранулометрического состава на прочность брэкса с цементно-бентонитовым связующим нами проведено сравнение свойств брэксов из коксовой



Фиг. 1. Оборудование и средства измельчения материалов для жесткой экструзии: *a* — молотковая мельница Steele; *б* — валковая дробилка Steele; *в* — продавливание в экструдере через протирачную пластину (см. справа)

мелочи, предварительно доизмельченной тремя способами: в молотковой мельнице, валковой дробилке и двойным продавливанием через протирачную пластину в экструдере (фиг. 1). Для гранулометрического анализа измельченного материала использовали влажное просеивание в грохотах с отверстиями сит 4,75—0,045 мм. Содержание вла-

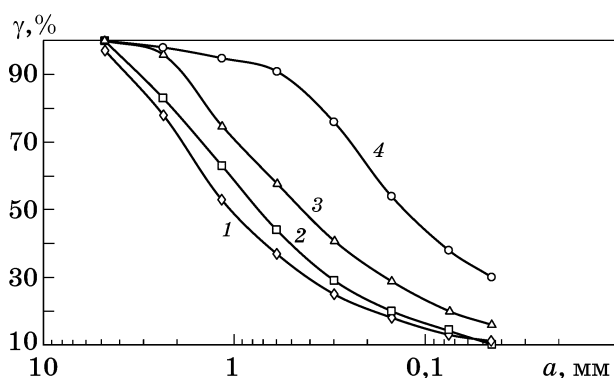
ги определяли на анализаторе влажности. Для анализа плотности образцов применяли калиброванные электронные весы с возможностью измерения плотности.

Результаты гранулометрического анализа коксовой мелочи до и после обработки с целью доизмельчения приведены в табл. 1 и на фиг. 2. Видно, что наибольшую степень

Таблица 1

Гранулометрический состав коксовой мелочи при разных вариантах обработки для доизмельчения

Набор сит		Выход, %, соседних классов коксовой мелочи			
меш	мм	Исходный материал	Молотковая мельница	Валковая дробилка	Двойное продавливание
4	4,75	97	100	100	100
8	2,36	78	83	96	98
16	1,16	53	63	75	95
30	0,6	37	44	58	91
50	0,3	25	29	41	76
100	0,15	18	20	29	54
200	0,075	13	14	20	38
325	0,045	11	10	16	30



Фиг. 2. Гранулометрический состав коксовой мелочи в состоянии: 1 — исходном; 2—4 — после доизмельчения соответственно в молотковой мельнице, валковой дробилке и двойным продавливанием в экструдере; точки на кривых соответствуют ситам из набора (см. табл. 1); γ — выход надрешетной массы; a — размер отверстий сит

измельчения коксовой мелочи обеспечило двойное продавливание через протирочную пластину в экструдере. Эффект глубокого измельчения в этом случае достигается за счет приложения высоких сдвиговых напряжений. Использование молотковой мельницы для такого материала оказалось малоэффективным, в итоге по гранулометрии молотый материал незначительно отличался от исходной коксовой мелочи.

Лабораторный смеситель Hobart был использован для смешивания с водой и шнекования измельченного материала и моделировал обработку шихты в открытом объеме глиномялки с вакуумным затвором. Лабораторный экструдер, применявшийся для производства образцов брэксов, имитировал процесс продавливания материала через решетки дегазатора в вакуумную камеру, а затем и саму экструзию. Все брэксы имели одинаковый

компонентный состав, %: коксовая мелочь 94; портландцемент 5; бентонит 1.

Полученные результаты и их обсуждение. В соответствии с примененным способом измельчения брэксам присвоены следующие номера: №1 — коксовая мелочь измельчена валковой дробилкой; №2 — коксовая мелочь дважды продавлена шнеком экструдера через протирочную пластину (толщина 3 мм) со множеством отверстий; установленный в непосредственной близости от нее выпорной шнек при вращении проталкивает сырье через эти отверстия, материал при этом измельчается за счет перетирания; №3 — коксовая мелочь измельчена молотковой мельницей. Параметры экструзии и физические свойства брэксов приведены в табл. 2. Как видно из приведенных данных, экструдирование первых двух смесей выполнено при близком значении параметров процесса, в то время как при продавливании более крупных частиц смеси №3 (молотковая мельница) отмечено повышение температуры материала, в итоге брэкс из наиболее крупных частиц оказался наименее прочным при испытании на осевое сжатие. По энергетическим затратам наиболее эффективным оказалось экструдирование смеси №1. Ее отличная экструдированность может быть связана со спецификой формы частиц материала после измельчения в валковой дробилке, способствующей их плоскопараллельной ориентации.

Разность величин прочности на сжатие брэксов №1 и 2 незначительна и может свидетельствовать лишь о более раннем начале развития трещинообразования в брэксе №2. Из приведенных данных также следует, что плотность брэкса из смеси, подвергнутой двойному продавливанию, оказалась на 2,5% выше плотности брэксов из измельченной и

Таблица 2

Параметры экструзии и физические свойства брэксов из коксовой мелочи

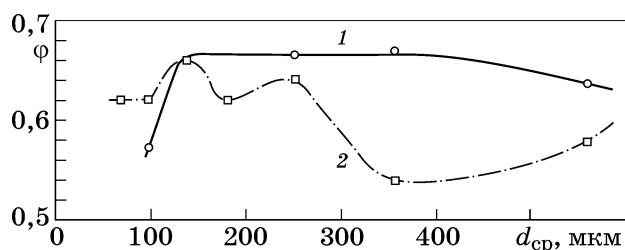
Образец брэкса (способ измельчения)	W , %	p , кПа	t , °C	ρ , г/см ³	σ , МПа
№1 (валковая дробилка)	16,5	2,03	30,56	1,630	3,7
№2 (двойное продавливание)	16,7	2,37	33,33	1,674	3,4
№3 (молотковая мельница)	16,6	10,81	55,56	1,627	2,0

Примечание. Использованные обозначения: W — влажность; p — вакуум; t — температура материала; ρ — плотность брэксов; σ — прочность брэксов на сжатие.

дробленной коксовой мелочи. Очевидно, плотная упаковка частиц брэкса №2 — следствие более высокой степени измельчения материала. Кстати, в отличие от брэксов №1 и 3 в этом случае при экструзии не наблюдалось никакого обезвоживания смеси.

Различие в величинах прочности на сжатие брэксов, изготовленных из коксовой мелочи одной партии, но по-разному обработанной, может быть следствием ряда причин, связанных с неодинаковыми размером и формой частиц материала, а также рельефом их поверхности. Форма частиц после измельчения может зависеть как от характеристик самого материала, так и от способа измельчения, включая и длительность последнего [4—6]. Например, общепризнано, что материал после измельчения в валковых дробилках состоит преимущественно из частиц угловатой формы, тогда как частицы материала после шаровых и молотковых мельниц, как правило, равноразмерны и округлы. Измельчение в валковых дробилках происходит под действием сжимающих, срезающих и истирающих сил. В результате образуются шероховатые частицы, имеющие острые выступы со многими ребрами и углами и соответственно большую поверхность контактов. В молотковых мельницах вследствие ударных взаимодействий поверхность частиц шлифуется, и они приобретают более округлую форму.

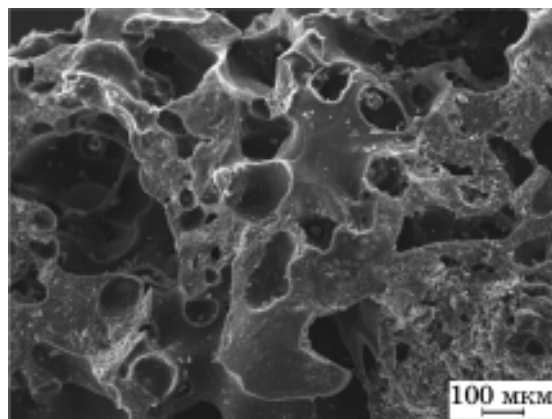
Так, в работе [7] изучено влияние типа измельчающего устройства на форму частиц нефтяного кокса двух разновидностей — малопористого с толстыми стенками ячеек без видимых трещин и трещиноватого, величины пористости и толщин стенок ячеек которого распределены в широком диапазоне. Для кокса первого типа способ измельчения не оказал сколько-нибудь заметного влияния на форму частиц с размерами 200—600 мкм. Для пористого же и трещиноватого кокса были выявлены различные зависимости формы частиц от их размеров при измельчении в молотковой мельнице и валковой дробилке [7] (фиг. 3). Приведенные кривые отражают следующую зависимость фактора формы: $\phi = 1,1V^{1/3}N^{1/6}A^{-1/2}$, где V — удельный объем частицы, см³/г; N — число частиц в 1 г вещества; A — удельная площадь поверхности, см²/г. Для частиц материала, измельченного в молотковой мельнице, отмечены стабильно высокие значения фактора формы,



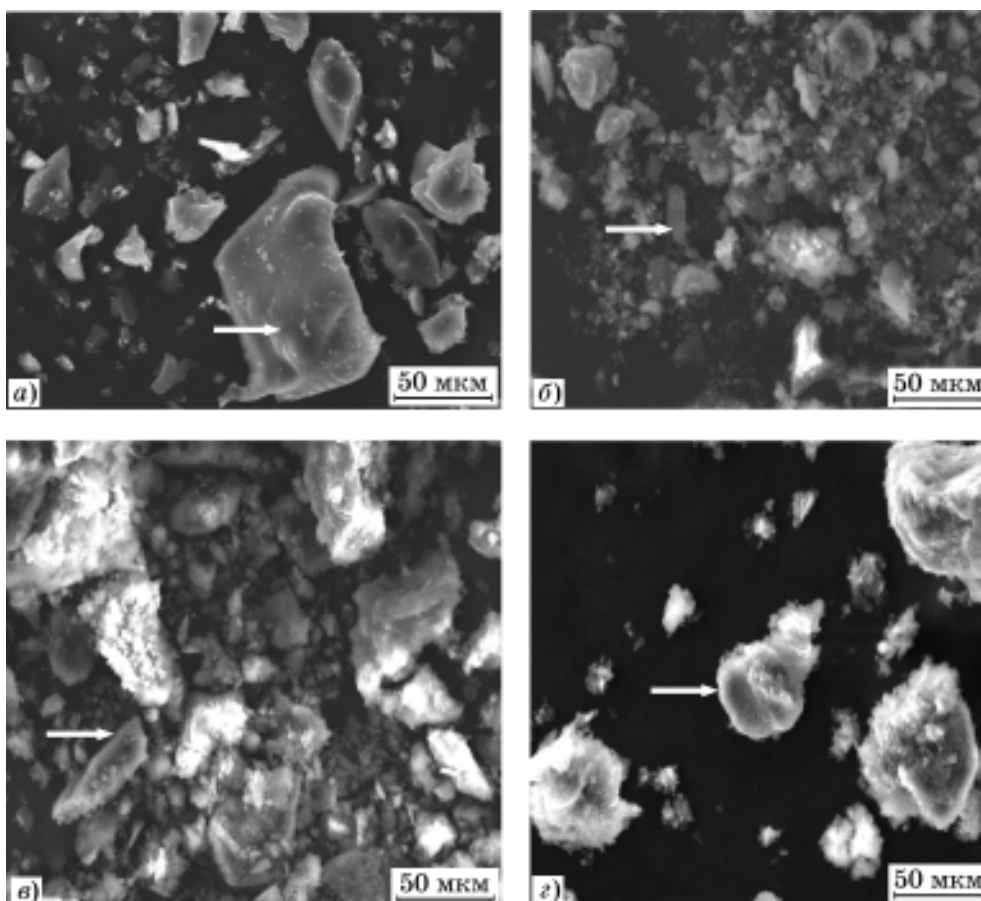
Фиг. 3. Зависимость фактора формы частиц ϕ от их среднего размера при измельчении в молотковой мельнице (кр. 1) и валковой дробилке (кр. 2) [7]

что свидетельствует о близости формы большинства частиц в рассматриваемом диапазоне значений к округлому виду. Для частиц материала, измельченного валковой дробилкой, значения величин фактора формы в диапазоне размеров частиц 140—600 мкм ниже и минимальны при размерах ~350 мкм, что подтверждает в целом вывод о более неоднородной форме частиц после измельчения в валковой дробилке.

Как и в работе [7], мы использовали пористый и трещиноватый материал. Изображение частиц коксовой мелочи, полученное с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6490 LV, приведено на фиг. 4. Сопоставление форм частиц исходной коксовой мелочи и коксовой мелочи после доизмельчения приведено на фиг. 5. Частицы исходной коксовой мелочи можно отличить по бугоркам (округлостям), характерным для кокса; они принадлежат внутренним (не раскрывшимся) порам, расположенным под верхними слоями углеродистого материала. Видно, что частицы после валковой дробилки и двойного продавливания через экструдер имеют неоднородную угловатую форму, тогда как форма частиц коксо-



Фиг. 4. Микроструктура частиц коксовой мелочи (сканирующая электронная микроскопия)

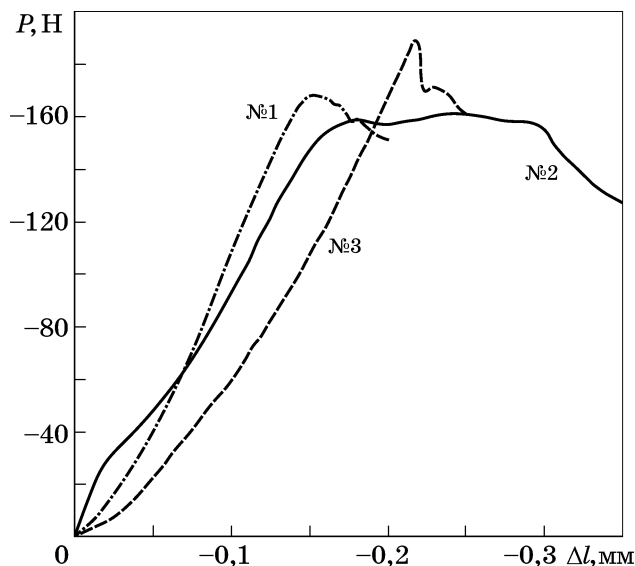


Фиг. 5. Микроснимки частиц исходной коксовой мелочи (а) и после доизмельчения в валковой дробилке (б), двойным продавливанием через экструдер (в) и в молотковой мельнице (з). Стрелки указывают на частицы коксовой мелочи характерной формы

вой мелочи после измельчения в молотковой мельнице более округлая.

Далее брэксы испытывали на прочность на растяжение образцов при раскалывании, используя настольную одноколонную электромеханическую испытательную машину Instron 3345 с нагружающей способностью 5 кН. Ранее на основе изучения статистики распределения ориентаций брэксов в завалке нами было показано, что именно такая внешняя нагрузка для цилиндрического брэкса наиболее вероятна [8, 9]. Результаты испытания специально подготовленных образцов брэксов №1—3 (диаметр 25 мм, высота 20 мм, цилиндрическая форма) приведены на фиг. 6. Видно, что при примерно одинаковой несущей способности брэксов их реакция на внешнюю нагрузку разная.

Разница в величине максимальной нагрузки может быть связана с дефектами образцов. Однако разница в характере поведе-



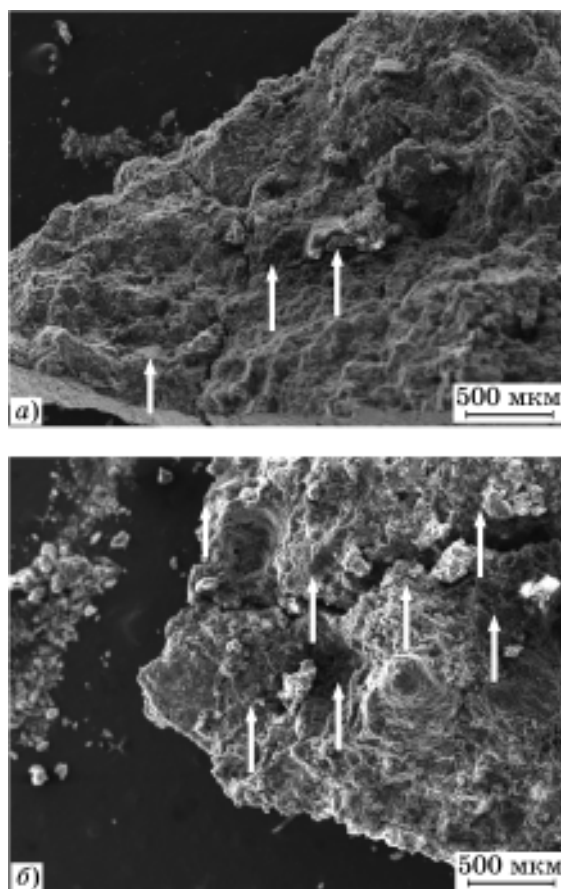
Фиг. 6. График нагрузка P —перемещение Δl при испытании брэксов на прочность на растяжение при раскалывании

ния имеет принципиально иные причины. Брэксы №2 продемонстрировали вязкий характер разрушения, о чем свидетельствует наличие «площадки текучести» (горизонтальная составляющая кривой брэкса №2). Такое явление, на наш взгляд, может быть объяснено с позиций соотношения Холла—Петча [10] «эстафетным» характером передачи скольжения от зерна к зерну. Граница зерен в этом случае является барьером для продвижения дислокаций, которое, в свою очередь, вызывает зарождение и развитие дислокаций в соседнем зерне. Другими словами, чем большее количество таких барьеров необходимо преодолеть, тем менее динамично распространение дислокаций и тем больше сопротивление развитию трещины.

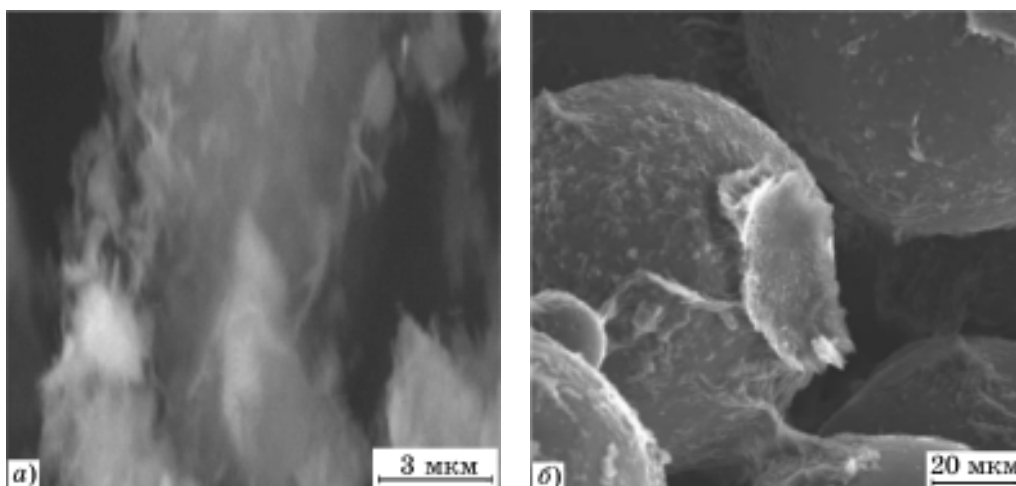
Вероятно, существует пороговое значение среднего размера частиц, ниже которого возможно полное блокирование распространения трещин в брэксе. Очевидно, что гранулометрический состав смеси для изготовления брэксов №2 способствует именно такому сценарию в силу самого высокого содержания в сравнении с другими смесями тонких частиц (см. табл. 2). Наблюдается сохранение целостности брэкса №2 даже после прекращения тестового испытания. Для брэкса №2, следовательно, 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 после инициации трещины отмечено заметное падение кривой нагрузка—перемещение, что свидетельствует о более хрупком разрушении образцов. В то же время в брэксе №1 хрупкое разрушение будет развиваться медленней, чем в брэксе №3, в силу более низких значений среднего размера частиц. Заметим, что данные обстоятельства являются чрезвычайно важными для практики брикетирования. Зачастую даже в пределах одного предприятия для доставки брикетов до печи могут потребоваться нескольких операций погрузки-выгрузки, сопряженных с сбрасыванием брикетов с высоты. При увеличении ударной прочности окускованного продукта возможно существенное упрощение и, следовательно, удешевление логистики 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 оборудования, которое применяется для окускования.

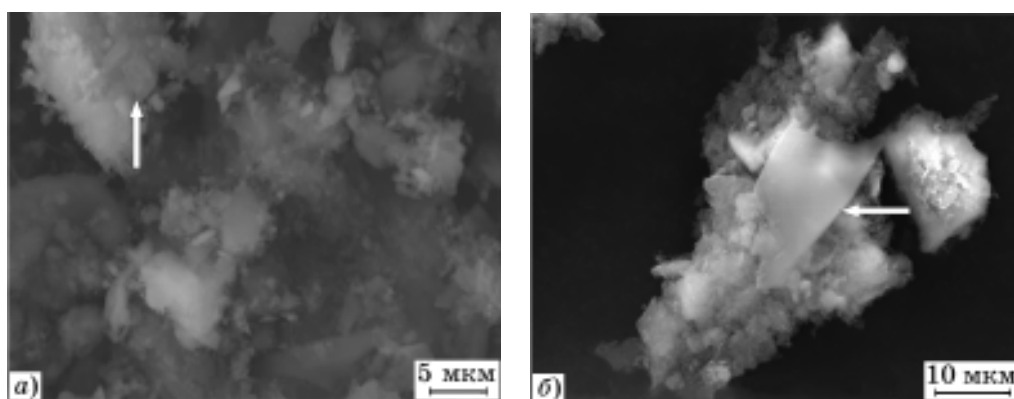
В дополнение к действию физических механизмов ослабления распространения дислокаций, приводящих к большей ударной прочности брэксов, изготовленных из более мелких частиц, значительный вклад в прочность брэксов вносит и характер распределения связующего в теле брэкса. Понятно, что более низкие значения прочности при сжатии брэксов №3 могут быть объяснены меньшим количеством контактов частиц. Для иллюстрации на фиг. 7 приведены микроснимки поверхности частиц материалов №3 (измельчение в молотковой мельнице) и №2 (двойное продавливание через протирочную пластину). Хорошо видно, что в силу меньшей шероховатости поверхности частиц брэкса №3 по сравнению с брэксом №2 и количество «островков» со связующим (цемент и бентонит) на их поверхности (светлые скопления) существенно меньше. (Минералы содержат более тяжелые химические



Фиг. 7. Микроснимки поверхности частиц брэксов №3 (а) и №2 (б)



Фиг. 8. Волокна бентонита на поверхности частиц брэкса №2 (а) и на поверхности стеклянных микросфер (б) [11]



Фиг. 9. Частицы бентонита в брэксах №1 (а) и №3 (б)

элементы, потому проявляются как более светлые выделения на снимках.) Из приведенного следует, что рельеф частиц брэкса №2 способствует лучшему сцеплению частиц, в том числе вследствие большего объема связующего, покрывающего места контактов частиц.

При изучении поверхности частиц брэкса №2 нами было обращено внимание на наличие на ней волокон бентонита, которые впервые были описаны в работе [11]. На фиг. 8 приведены изображения поверхности частицы брэкса №2 и поверхности стеклянных микросфер, подвергнутых мягкой прокатке (без раздавливания) в валковой дробилке, имитирующей сдвиговое напряжение. Такая обработка способствовала развитию волокон бентонита, покрывающих поверхность частиц. После такой предварительной обработки смеси магнетитового концентрата и бентонита доля бентонита, необходимого для обеспечения требуемой прочности, снизилась вдвое (с 0,66 до 0,33% массы концентрата).

Возникновение такой структуры в брэксе №2, возможно, является следствием такого же сдвигового напряжения, которое испытывает материал во время шнековой экструзии. Эффект появления волокон бентонита менее выражен для брэксов №1 и 3, что, возможно, связано с меньшей долей тонких частиц. Обнаруженное явление будет изучено в дальнейшем. В брэксах №1 и 3 выявлены преимущественно пластинчатые и чешуйчатые формы частиц бентонита (фиг. 9).

Выводы. 1. Способ измельчения коксовой мелочи может влиять на размер, форму и рельеф поверхности частиц. Степень такого влияния зависит от особенностей структуры материала, прежде всего пористости. Неоднородность рельефа поверхности частиц коксовой мелочи (шероховатость) способствует росту прочности брэксов вследствие увеличения числа контактных участков и концентрации связующего вблизи этих участков.

2. Гранулометрический состав коксовой мелочи влияет не только на величину проч-

ности при сжатии, но и определяет характер разрушения брэкса при статических и динамических нагрузках. В зависимости от степени измельчения хрупкий характер разрушения может смениться вязкопластичным, что приводит к росту ударной прочности брэксов.

3. Сдвиговые напряжения, сопровождающие процесс экструзии, могут способствовать развитию волоконной структуры бентонита, способствующей большей прочности брэкса. Для достижения необходимой тонины измельчения коксовой мелочи может быть использован протирочный экструдер.

Авторы выражают благодарность д.т.н., проф. Кудре А.В. (МИСиС, кафедра металлургии и физики прочности) за обсуждение материалов статьи и ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Курунов, И.Ф.* Жесткая вакуумная экструзия Steele — перспективный способ окускования металлургического сырья и отходов / И.Ф. Курунов, А.М. Бижанов // Бюл. НТИЭИ : Чер. металлургия. 2012. №4. С.46—49.
2. *Курунов, И.Ф.* Брэксы — новый этап в окусковании шихты для доменных печей / И.Ф. Курунов, А.М. Бижанов // Металлург. 2014. №3. С.49—53.
3. *Бижанов, А.М.* Опыт применения брикетов экструзии (брэксов) для выплавки ферросиликомарганца / А.М. Бижанов, Г.С. Подгородецкий, И.Ф. Курунов [и др.] // Металлург. 2013. №2. С.50—55.
4. *Kaya, E.* Particle shape modification comminution / E. Kaya, R. Glogg, S.R. Kumar // Kona. 2002. V.20. P.185—195.
5. *Ulusoy, U.* Role of shape properties of calcite and barite particles on apparent hydrophobicity / U. Ulusoy, C. Hicyilmaz, M. Yekeler // Chem. Eng. Process. 2003. V.43. P.1047—1053.
6. *Ulusoy, U.* Determination of the shape, morphological and wettability properties of quartz and their correlations / U. Ulusoy, M. Yekeler, C. Hicyilmaz // Mineral Eng. 2003. V.16. P.951—964.
7. *Beirne, T.* The shape of ground petroleum coke particles Brit / T. Beirne, J. M Hutcheon // J. Appl. Phys. 1954. №3. P.576.
8. *Бижанов, А.М.* Исследование механической прочности брэкса. Ч.1 / А.М. Бижанов, И.Ф. Курунов, Н.М. Дуров [и др.] // Металлург. 2012. №7. С.32—35.
9. *Бижанов, А.М.* Исследование механической прочности брэкса. Ч.2 / А.М. Бижанов, И.Ф. Курунов, Н.М. Дуров [и др.] // Металлург. 2012. №10. С.36—40.
10. *Малыгин, Г.А.* Прочность и прочность нано- и микрорекристаллических материалов : обзор / Г.А. Малыгин // ФТТ. 2007. Т.49. Вып.6. С.961—982.
11. *Kawatra, S.K.* Effects of bentonite fiber formation in iron ore pelletization / S.K. Kawatra, S.J. Ripke // Intern. J. Miner. Process. 2002. V.65. P.141—149.