

БРИКЕТ ЭКСТРУЗИОННЫЙ (БРЭКС) – ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ

А.М. Бижанов¹, И.Ф. Курунов², Н.М. Дуров³, Д.В. Нуштаев⁴, С.А. Рыжов⁴

¹ J.C. Steele & Sons, Inc, США

² ОАО «НЛМК», г. Липецк, Россия

³ МИСус, г. Москва, Россия

⁴ ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия

Технология окускования дисперсных материалов методом жесткой вакуумной экструзии, разработанная компанией J.C. Steele & Sons, Inc. (США, [1]) переживает в настоящее время свое второе рождение, привлекая внимание все более широкого круга специалистов горно-металлургического комплекса. Уже первые практические результаты промышленного производства брэксов и их применения в качестве шихтового материала доменной печи [2] позволяют считать технологию их получения наиболее перспективной для окускования природного и техногенного металлургического сырья. Одним из основных требований, предъявляемых к брэксу - новому компоненту шихты металлургических печей, является его механическая прочность, обеспечивающая сохранение целостности брэкса как на пути от фабрики брикетирования до загрузки в печь, так и при и его дальнейшем участии в металлургическом переделе в качестве адекватной альтернативы агломерату или окатышам. В этой связи целесообразно отметить следующие особенности технологии жесткой вакуумной экструзии, определяющими ее привлекательность для металлургии и горного дела и принципиально отличающими ее от традиционных для металлургии технологий брикетирования:

1. Высокая механическая прочность «сырых» брэксов, обусловленная созданием разряжения в вакуумной камере экструдера в процессе брикетирования и удалением, в результате этого, более 93% воздуха из формируемого материала. Это приводит к росту плотности смеси до ее формования, обеспечивает высокую прочность при меньшем расходе связующего, по сравнению с другими технологиями брикетирования, и не требует термической обработки для достижения рабочей прочности брэксов и необходимых для этой обработки логистических операций и соответствующего оборудования.
2. Возможность производства брэксов различной формы и размера, оптимальных - для металлургической технологии, в которой они используются, что достигается простым изменением профилей и размеров выходных отверстий фильера экструдера.

В настоящей работе с применением методов математического моделирования исследовали влияние формы поперечного сечения брэкса на его прочностные характеристики, а именно на прочность на раздавливание. Вариант нагружения брэкса, принятый для оценки величины прочности на раздавливание, приведен на рис. 1.

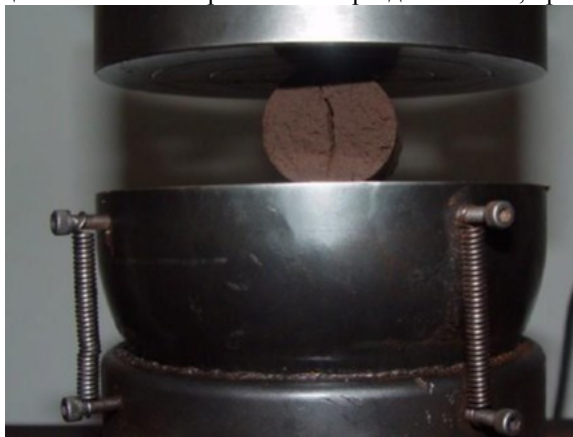


Рис. 1 - Раздавливание цилиндрического (регулярного) брэкса

Поводом для изучения этого вопроса явились результаты определения прочности на раздавливание брэксов цилиндрического и овального сечения, полученных из одной и той же шихты, но с применением разных конструкций фильера на промышленном экструдере Steele. Прочности на раздавливание указанных брэксов отличались почти вдвое, составив для круглого брэкса $67,7 \text{ кгс/см}^2$ и $129,7 \text{ кгс/см}^2$ для брэкса с сечением близким к овалу. Произведенные измерения плотности показали полное совпадение ее величины для обоих образцов $2,592 \text{ г/см}^3$ и $2,6 \text{ г/см}^3$ соответственно. В то же время, при испытании брэкса на прочность на раздавливание вдоль длинной оси овала и при наличии стенок со стороны уплощенных поверхностей брэкса его прочность составила $123,9 \text{ кг/см}^2$. Можно предположить, что различие в величинах разрушающей нагрузки вызвано различием площадей контактной поверхности при раздавливании. У брэкса круглого поперечного сечения пятно контакта имеет меньшую площадь, чем у овального при наложении нагрузки вдоль малой оси. Таким образом, при равенстве нагрузки величина действующих напряжений в брэксе овального сечения, при его раздавливании вдоль короткой оси, меньше, чем в брэксе круглого сечения. Ясно также, что при раздавливающем усилии, направленном вдоль длинной оси овала, величины напряжений будут соответственно выше. Для проверки данных предположений нами была выполнена конечно-элементная имитация натурального эксперимента по раздавливанию брэкса с использованием вычислительных ресурсов программного комплекса [SIMULIA Abaqus](#) [4].

Исследовали брэксы с круглым и овальным профилями их поперечного сечения одинаковой площади. Отношение длин большой и малой осей овала равно 2.

На рис. 2 представлена принципиальная расчётная схема численного эксперимента, справедливая для всех рассмотренных случаев.

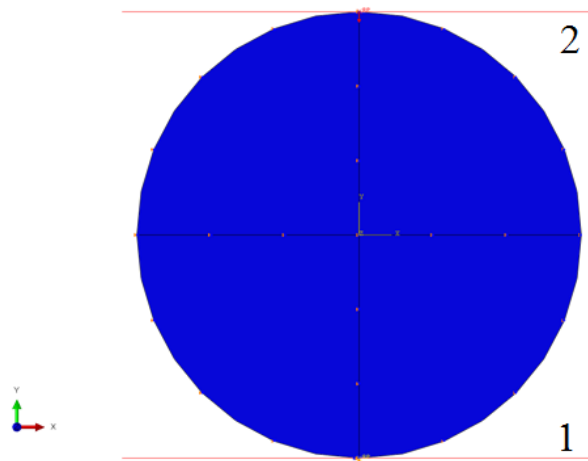


Рис. 2 – Постановка задачи

Снизу профиль свободно оперт на жесткую недеформируемую поверхность 1, а сверху на него давит поверхность 2 с постоянной для всех расчётных случаев силой. Для брэкса с овальным сечением рассматривали два варианта нагружения, вдоль малой и вдоль большой осей. Конечно-элементное моделирование производили с использованием линейно-упругой модели материала. Осредненные свойства материала брэкса (модуль Юнга - 10 ГПа и коэффициент Пуассона - 0,3) были выбраны на основе рекомендаций [3].

В результате математического моделирования получены распределения эквивалентных напряжений по Мизесу в профиле поперечного сечения брэкса.

Таким образом, можно сделать заключение, что технология брикетирования методом жесткой вакуумной экструзии позволяет достаточно просто управлять осевой неоднородностью прочности брэкса на раздавливание. При переходе от круглого к овальному сечению брэкса, что достигается простой заменой фильеры, происходит своеобразное перераспределение ресурса прочности. Выигрыш в величине прочности на раздавливание при варианте нагружения вдоль короткой оси овала, компенсируется снижением прочности вдоль его длинной оси.

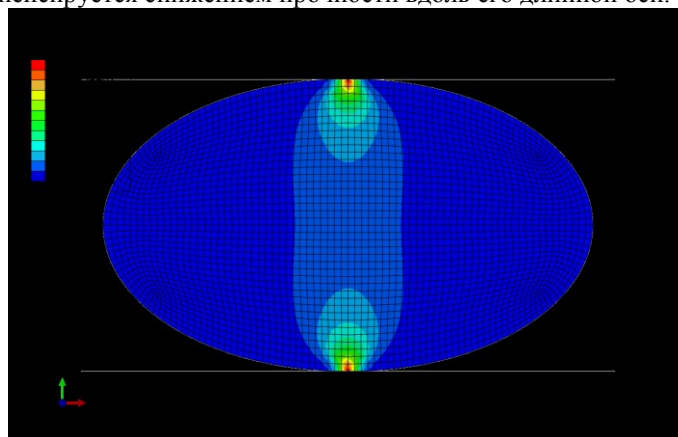


Рис. 3 - Распределение напряжений по Мизесу

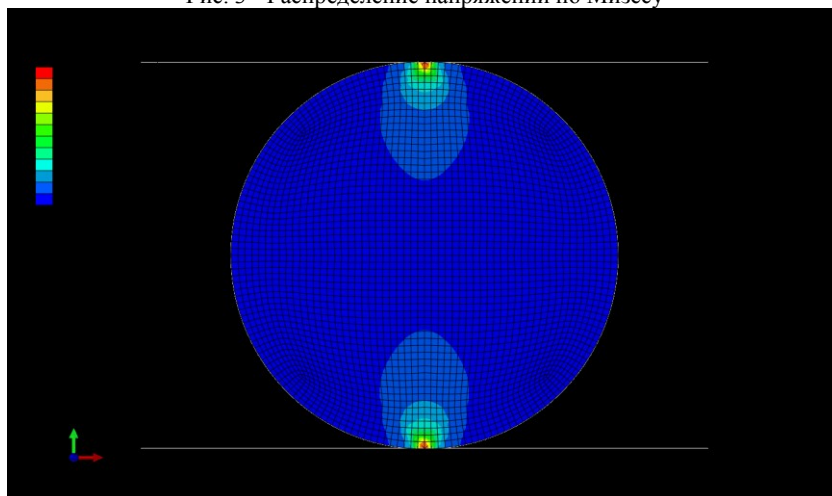


Рис. 4 – Распределение напряжений по Мизесу

Табл. 1 - Значения максимальных напряжений при различных вариантах нагружения

Метод получения	Вид сечения	Вариант нагружения	Величина максимальных напряжений по Мизесу, [МПа]
Жесткая экструзия	Овал	1	39,8
	Овал	2	79,6
	Круг	-	59,3

Приведенные заключения справедливы только для варианта испытания прочности брэкса на раздавливание при четкой ориентации прилагаемого раздавливающего усилия и отсутствии бокового давления. В реальных условиях нахождения брэкса в штабеле или в слое шихты в металлургическом агрегате необходимо учитывать более сложный характер распределения напряжений в брэксе, «зажатом» в засыпке. Целесообразность управления прочностью брэкса на раздавливание может возникнуть в случаях, когда заранее известна, или может быть обеспечена, преобладающая ориентация брэксов в засыпке (в штабеле, в слое шихты в печи и т.д.).

Моделирование напряжений в валковом брикете

При моделировании напряжений в брикете, получаемом в валковом прессе также применили конечно-элементную имитацию статического нагружения эллипсообразного профиля поперечного сечения брэкса, близкого по форме к профилю поперечного сечения брикета, изготовленного на валковом прессе. Общеизвестна анизотропия прочностных показателей такого брикета. При так называемом давлении на «плошку» и на «ребро» величины прочности валковых брикетов могут отличаться в разы. Для брикетов, изготовленных на валковом прессе, характерное отношение большой оси к малой в эллиптическом профиле поперечного сечения равно 4. Также как и в предыдущем случае, расчёты выполнены для случаев нагружения вдоль малой и большой осей эллипса. В табл. 3 представлены характерные распределения эквивалентных напряжений по Мизесу, полученные в ходе деформирования поперечного сечения брикетов.

Таким образом, видно, что для брэкса, близкого по форме к валковому брикету осевая неоднородность выражена в большей степени, чем для овального с отношением длин короткой и длинной осей 1:2.

Табл. 2 – Значения максимальных напряжений в валковом брикете

Метод получения	Вариант нагружения	Величина максимальных напряжений по Мизесу, [МПа]
Валковый брикет	1	31,26
	2	98,8

Моделирование напряжений в брикете, получаемом вибропрессованием

Аналогичным образом, нами был произведен конечно-элементный анализ распределения полей напряжений, возникающих при раздавливании брикета, получаемого вибропрессованием.

Табл. 3 - Значения максимальных напряжений в сечение брикета

Метод получения	Вариант нагружения	Величина максимальных напряжений по Мизесу, [МПа]
Вибро-прессование	1	105
	2	6,08

В этом случае, при давлении на ребро брикета, возникают напряжения, существенно превосходящие таковые в брэксе. Заметим, что подобное сопоставление является гипотетическим, поскольку вибропрессованием невозможно экономически оправданное изготовление брикетов размером менее 30 мм.

Заключение

Приведенные выше результаты демонстрируют принципиальную возможность управления прочностью брэкса, путем изменения круглой формы его поперечного сечения на овальную простой заменой фильеры экструдера с круглыми отверстиями на фильеру с овальными отверстиями. Переход к овальной форме тела брэксов приводит к «перераспределению» ресурса прочности между различными осевыми направлениями в брэксе. При давлении на уплощенную поверхность брэкса с овальным поперечным сечением он способен воспринять без разрушения почти в два раза большее давление по сравнению с брэксом, имеющим круглое поперечное сечение. Такое упрочнение происходит за счет снижения прочности брэкса при нагрузке на него вдоль длинной оси его поперечного сечения. В пользу практической ценности придания поперечному сечению брэкса овальной формы могут свидетельствовать результаты испытаний на раздавливание брэкса, зажатого с боков в варианте нагружения 2, что моделирует реальное механическое воздействие на брэксы в слое шихты. Экспериментально установлено, что величина прочности брэкса в таком положении отличалась от указанной выше ($129,7 \text{ кгс/см}^2$) незначительно и составила $123,9 \text{ кгс/см}^2$. Заметим также, что при переходе

к овальной форме, увеличивается и площадь свободной поверхности (для брэкса с отношением полуосей 1:2 рост площади составит 5.8%), что положительно влияло бы на процесс сушки брэкса и, возможно, на процесс его восстановления при увеличившейся площади поверхности, обдуваемой потоком газа.

Список литературы

1. R.B. Steele, "Agglomeration of Steel Mill By-products via Auger Extrusion". Proc. 23d Biennial Conf. IBA, Seattle, WA, USA (1993) 205-217
2. Йогеш К. Далмиа, И.Ф. Курунов, Ричард Б. Стил, А.М. Бижанов. Производство и проплавка в доменной печи брикетов нового поколения. *Металлург* №3, 2012, с. 39-41.
3. Петроченков Р.Г., Абсагаров С.Х. Методы оценки упругих свойств анизотропных минеральных составляющих железистых кварцитов как квазитропных твердых тел. // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008. - №8. - С.249 - 253.
4. Abaqus User Manual, Version 6.12 Documentation.