

УДК 669.162.1:622.788

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ БРЭКСА

### Часть 1

© **Бижанов Айтбер Махачевич**<sup>1</sup>; **Курунов Иван Филиппович**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.;  
**Дуров Николай Михайлович**<sup>3</sup>; **Нуштаев Дмитрий Владимирович**<sup>4</sup>,  
**Рыжов Сергей Андреевич**<sup>4</sup>, канд. физ.-мат. наук

<sup>1</sup> J.C.Steele&Sons, Inc. USA, Statesville, NC. E-mail: abizhanov@jcsteele.com

<sup>2</sup> ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Россия, г. Липецк

<sup>3</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». Россия, Москва

<sup>4</sup> ООО «ТЕСИС». Россия, Москва

Статья поступила 16.04.2012 г.

Методами физического и численного экспериментов изучено влияние формы поперечного сечения экструзионного брикета (брэкса) на его механическую прочность. Показано, что при давлении на брэксы овального поперечного сечения нагрузкой, приложенной вдоль малой полуоси (при соотношении длин полуосей 1:2), прочность возрастает почти в два раза по сравнению с брэксом, имеющим круглое поперечное сечение. Продемонстрирована эффективность примененной методики расчета.

**Ключевые слова:** брикет экструзии (брэкс); жесткая вакуумная экструзия; механическая прочность; метод конечных элементов.

Технология окускования дисперсных материалов методом жесткой вакуумной экструзии, разработанная компанией J.C.Steele&Sons, Inc. (США) [1] переживает в настоящее время 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. Одно из основных требований к новому компоненту шихты – его механическая прочность, обеспечивающая сохранение целостности брэкса на пути от фабрики брикетирования до загрузки в печь и при его дальнейшем участии в металлургическом процессе. В этой связи следует отметить особенности технологии жесткой вакуумной экструзии, определяющие ее привлекательность для металлургии и горного дела и принципиально отличающие ее от традиционных для металлургии технологий брикетирования:

1. Высокая механическая прочность «сырых» брэксов, обусловленная созданием разрежения в вакуумной камере-экструдере в процессе брикетирования, что приводит к удалению более 93% воздуха из формируемой смеси и повышает ее плотность до формования. Это обеспечивает высокую прочность брэксов при меньшем, по сравнению с

другими технологиями брикетирования, расходе связующего и не требует термической обработки для достижения рабочей прочности брэксов и необходимых для этой обработки логистических операций и соответствующего оборудования.

2. Возможность производства брэксов различных форм и размеров, оптимальных для металлургических технологий, в которых они могут использоваться, что достигается простым изменением профилей и размеров выходных отверстий фильер экструдера.

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

Поводом для изучения этого вопроса явились результаты определения прочности на раскалывание брэксов цилиндрического и овального сечений, полученных из одной и той же шихты, но с применением фильер разных конструкций на промышленном экструдере Steele. Прочность на раскалывание этих брэксов различалась почти вдвое, составив для круглого брэкса 6,8 Н/мм<sup>2</sup> и 13 Н/мм<sup>2</sup> для брэкса с сечением, близким к овалу. Измерения плотности показали практически полное ее совпадение для обоих образцов – 2,59 и 2,6 г/см<sup>3</sup> соответственно. В то же время при ис-



Рис. 1. Раздавливание цилиндрического (регулярного) брэкса

питании брэкса на прочность на раскалывание вдоль длинной оси овала и при наличии стенок со стороны уплощенных поверхностей брэкса его прочность составила 12,4 Н/мм<sup>2</sup>. Можно предположить, что различие в величинах разрушающей нагрузки вызвано различием площадей контактной поверхности при раздавливании. Для брэкса круглого поперечного сечения пятно контакта имеет меньшую площадь, чем для овального, при наложении нагрузки вдоль малой оси. Таким образом, при равенстве нагрузки действующие напряжения 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 этих предположений авторами была выполнена конечно-элементная имитация натурного эксперимента по раздавливанию брэкса с использованием вычислительных ресурсов программного комплекса SIMULIA Abaqus [3].

Исследовали брэксы круглого и овального профилей поперечного сечения одинаковой площади. Отношение длины большой и малой осей овала равно двум. На рис. 2 представлена принципиальная расчетная схема численного эксперимента, справедливая для всех рассмотренных случаев. Снизу профиль свободно опирается на жесткую недеформируемую поверхность 1, а сверху он испытывает давление поверхности 2 (см. рис. 2) с постоянной для всех расчетных случаев силой. Для брэкса с овальным сечением рассматривали два варианта нагружения – вдоль малой (М) и большой (Б) осей. Конечно-элементное моделирование производили с использованием линейно-упругой модели материала. Усредненные свойства материала брэкса (модуль Юнга

**Максимальное напряжение при различных вариантах нагружения брэксов**

Вид сечения	Вариант нагружения	Максимальное напряжение по Мизесу, МПа
Овал	М	39,8
Овал	Б	79,6
Круг	–	59,3

$E = 10$  ГПа и коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ) были выбраны на основе рекомендаций авторов работы [4]. В результате математического моделирования получено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в поперечном сечении брэкса (рис. 3 – вариант нагружения М и рис. 4 – брэкс круглого сечения). Максимальные величины напряжения приведены в таблице.

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 происходит своеобразное перераспределение ресурса прочности. Увеличение величин прочности на раскалывание при варианте нагружения вдоль короткой оси овала компенсируется снижением таковых значений при нагружении вдоль его длинной оси.

Приведенные выводы справедливы только для варианта испытания прочности брэкса на раскалывание 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 засыпи. Целесообразность управления прочностью брэкса на раздавливание может возникнуть в случаях, когда заранее известна или может быть обеспечена преобладаю-

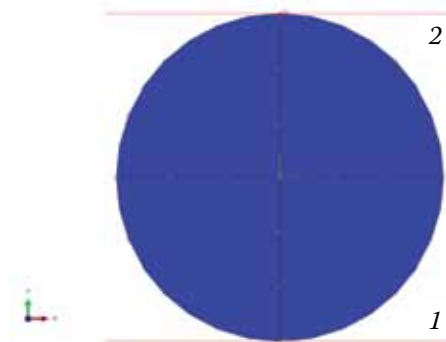


Рис. 2. Схема нагружения образца. Постановка задачи

щая ориентация брэксов в засыпи (в штабеле, в слое шихты в печи и т.д.).

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. Для брикетов, изготовленных на валковом прессе, характерное отношение большой (Б) оси к малой (М) в эллиптическом профиле поперечного сечения равно четырем. Так же, как и в предыдущем случае, расчеты выполнены для случаев нагружения вдоль малой и большой осей эллипса. Характерные распределения эквивалентных напряжений по Мизесу, полученные в ходе деформирования брикета, изготовленного на вал-

ковом прессе, по поперечному сечению, представлены ниже:

Вариант нагружения	Максимальное напряжение по Мизесу, МПа
М	31,26
Б	98,8

Таким образом, для брэкса, близкого по форме к брикету, изготовленному на валковом прессе, осевая неоднородность выражена в большей степени, чем для рассмотренного выше брэкса овального сечения с отношением длин короткой и длинной осей 1:2.

Моделирование напряжений в брикете, получаемом вибропрессованием. Аналогичным образом авторами был произведен конечно-элементный анализ распределения поля напряжений, возникающих при раздавливании брикета, получаемого вибропрессованием. Максимальные напряжения по сечению такого брикета приведены ниже:

Вариант нагружения	Максимальное напряжение по Мизесу, МПа
М	105
Б	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 фильерой 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 се-

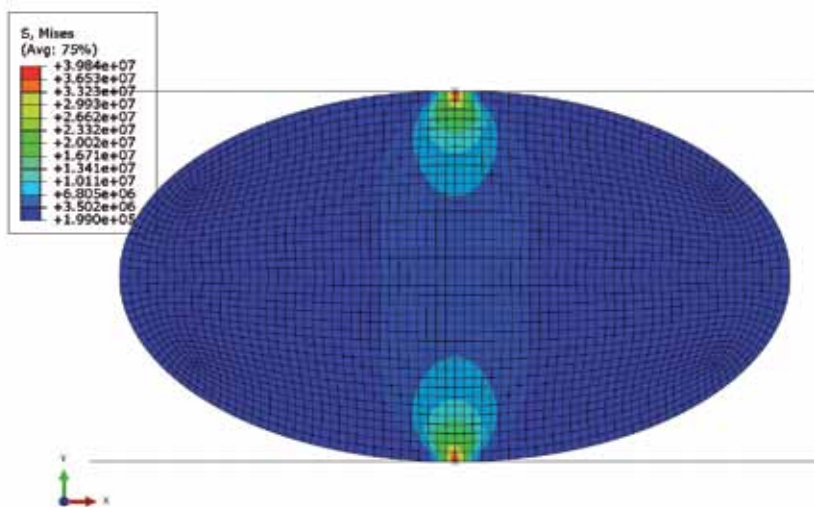


Рис. 3. Распределение напряжений по Мизесу, вариант нагружения М

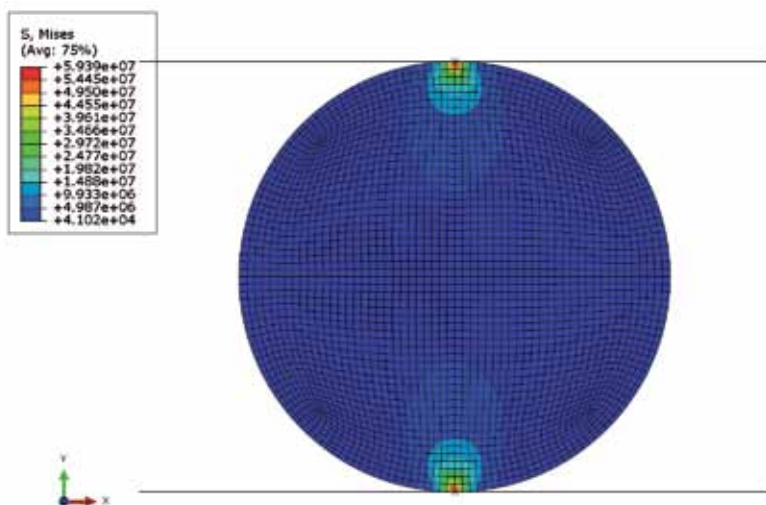


Рис. 4. Распределение напряжений по Мизесу – нагружение брэкса круглого сечения

чение. Такое упрочнение происходит в результате 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 раскалывание брэкса, зажатого с боков в варианте нагружения М, что моделирует реальное механическое воздействие на брэксы в слое шихты. Экспериментально установлено, что величина прочности брэкса в таком положении отличалась от указанной выше  $\approx 13 \text{ Н/мм}^2$  незначительно и составила  $12,4 \text{ Н/мм}^2$ . 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.

**Библиографический список**

1. **Steele R.B.** Agglomeration of Steel Mill By-products via Auger Extrusion. Proc. 23d Biennial Conf. IBA (Seattle, WA, USA). 1993. P. 205–217.
2. **Далмиа Й.К., Курунов И.Ф., Стил Р.Б., Бижанов А.М.** Производство и проплавка в доменной печи брикетов нового поколения // *Металлург*. 2012. № 3. С. 39–41.
3. **Петроченков Р.Г., Абсатаров 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. Электронный ресурс <http://www.thesis.com.ru> Abaqus User Manual, Version 6.12 Documentation.

**INVESTIGATION OF MECHANICAL STRENGTH OF BREX**  
**Part 1**

© **Bizhanov A.M.; Kurunov I.F.**, ScD, prof.; **Durov N.M.; Nushtaev D.V.; Ryzhov S.A.**, PhD

Based on the physical and the numeric simulations the influence of the shape of the cross-section of the extruded briquette (BREX) on its mechanical strength has been investigated. It has been showed that when the pressure is being applied along the shorter axis of the oval-shaped brex (with the axis ratio 1:2) the strength value can be almost doubled. High efficiency of the numeric model has been approved.

**Keywords:** extruded briquette (BREX); stiff vacuum extrusion; mechanical strength; finite elements method.

**ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ**

**Новая станция по наполнению баллонов Air Liquide в Санкт-Петербурге**



Северо-Западный федеральный округ отличается разнообразием обрабатывающих отраслей – постоянных потребителей технических газов в баллонах. Экономика региона занимает 4-е место в России по размеру валового регионального продукта.

В рамках стратегии долгосрочного развития в регионе Air Liquide ввёл в эксплуатацию новую станцию по наполнению баллонов в Колпино (Санкт-Петербург).

Построенная с использованием современных технологий Air Liquide новая станция позволит наполнять до 30 000 баллонов в месяц газами и газовыми смесями под торговыми марками Air Liquide, что обеспечит существующие и растущие потребности промышленных потребителей Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Новое оборудование позволяет полностью автоматизировать процесс наполнения баллонов и моноблоков, программировать состав производимых газовых смесей и контролировать их качество на всех этапах производственного процесса. Производимые газы и газовые смеси, в частности, широко используются в сварочной и пищевой отраслях промышленности.

Новые продукты и технологии по применению газов под торговыми марками Air Liquide будут реализовываться через современную систему снабжения, которую Air Liquide уже начал внедрять для своих клиентов.

Общая сумма инвестиций в проект составит более 5 млн евро.

Производственная площадка в Колпино позволит Air Liquide стать одной из лидирующих компаний отрасли в Северо-Западном регионе России.

