

УДК 669.162.1:622.788

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ БРЭКСА* Часть 2

© **Бижанов Айтбер Махачевич**¹; **Курунов Иван Филиппович**², д-р техн. наук, проф.;
Дуров Николай Михайлович³; **Нуштаев Дмитрий Владимирович**⁴;
Рыжов Сергей Андреевич⁴, канд. физ.-мат. наук

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

² ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Россия, г. Липецк.

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». Россия, Москва

⁴ ООО «ТЕСИС». Россия, Москва

Статья поступила 11.09.2012 г.

Изучены различные аспекты механической прочности брэкса (брикета экструзии). Выполнено конечно-элементное моделирование процесса разламывания длинного брэкса вскоре после выхода из фильеры. Построена модель укладки брэкса овального сечения в штабель, позволившая определить распределение ориентаций брэксов в грудке. Испытания на прочность образцов брэкса подтвердили сделанные ранее выводы о прочности на раздавливание и на раскалывание брэкса овального сечения. Выявлена количественная связь между прочностью на раздавливание и на раскол брэксов. Сопоставлены возможные механизмы разрушения полнотелого и полого брэксов.

Ключевые слова: брикет экструзии (брэкс); продукт экструзии; жесткая вакуумная экструзия; механическая прочность; метод конечных элементов; прочность на раздавливание; прочность на раскалывание.

В статье продолжается рассмотрение вопросов, связанных с механической прочностью шихтового материала нового вида для различных металлургических переделов – брэксов (брикетов экструзии) [1]. Применение брэксов в доменной плавке и результаты изучения их металлургических свойств рассмотрены в статьях [2–3].

Отличительной особенностью продуктов экструзии наряду с высокой прочностью на выходе из фильеры экструдера является их достаточно большая длина. Длина продукта экструзии, производимого на основе доменного и конвертерного шламов компанией Suraj Products Limited (Индия), превышает его диаметр (2,5 мм) в десять раз (рис. 1, а). При окусковании мелочи хромовой руды с 5% бентонита длина продукта экструзии в лабораторном опыте превысила 1 м. Тем не менее, как показал опыт компании J.C.Steele&Sons, Inc. (США), эта особенность проявляется лишь в пределах экструзионной установки. В результате транспортировки по конвейерам и последующих перевалок и штабелирования окончательная длина продукта экструзии, как правило, не превышает двух-трех диаметров (рис. 1, б). Именно такой, принявший окончательную длину продукт экструзии мы и называем брэксом. Таким обра-

зом, обычно не требуется каких-либо специальных мер для регулирования длины брэксов. Заметим, что для особых случаев, когда необходимо обеспечить требуемую техническими условиями длину продуктов экструзии, экструдер Steele может быть оснащен устройством для резки продуктов экструзии непосредственно на выходе из фильеры.

Конечно-элементная имитация процесса разламывания длинного продукта экструзии при его выходе из экструдера под действием собственной массы, выполненная с использованием программного комплекса Simulia Abaqus [4], позволила удовлетворительно объяснить и описать механизм такого разламывания. Были выявлены зоны максимальных напряжений и области иницирования разрушения материала. На рис. 2 приведены результаты моделирования различных стадий разламывания продукта экструзии как при выходе из экструдера, так и при падении на опорную поверхность (пол, лента конвейера и т.д.)

Ранее (см. часть 1, [1]) было высказано предположение о целесообразности придания сечениям брэксов овальной формы. Возможность снижения расхода связующего, достигаемая бла-

*Часть 1 см. Металлург. 2012. № 7. С. 32–35.



а



б

Рис. 1. Продукты экструзии на выходе из экструдера Steele 25 (а); брэксы в штабеле (б). Индия, Suraj PL, июль 2012

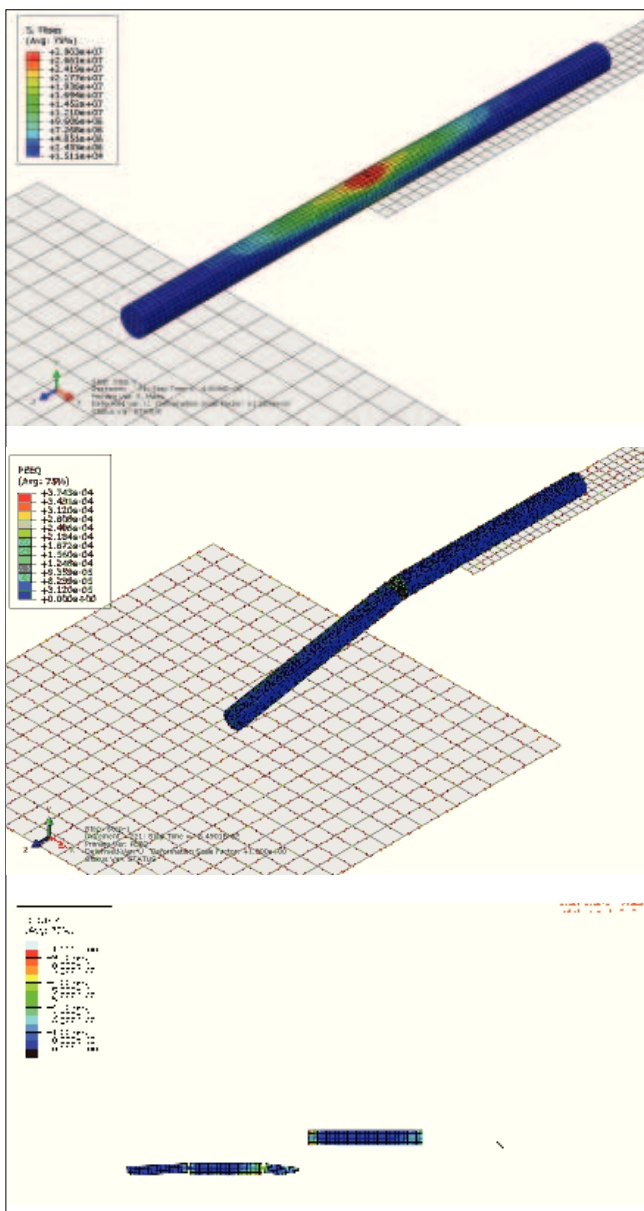


Рис. 2. Модель разламывания длинного продукта экструзии при выходе из экструдера и последующих перегрузках

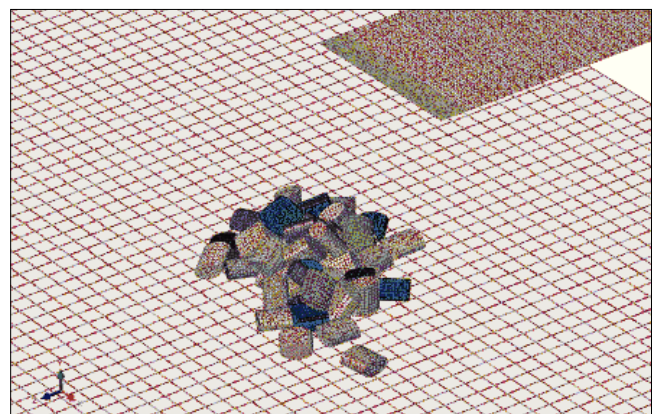


Рис. 3. Распределение брэксов в штабеле после падения с ленты конвейера



Рис. 4. Брэксы из торфа (ИОТТ, г. Люберцы, август 2012 г.)

годаря росту прочности овального брэкса при раскалывании вдоль короткой полуоси, имела бы свою практическую ценность в условиях, когда именно такое усилие преобладало бы в засыпке из брэксов (в штабеле, в скипе, в печи). Интуитивно понятно, что положение брэкса «плашмя», т.е. как в варианте нагружения М [1], является



Рис. 5. Образцы брэксов для испытаний на прочность

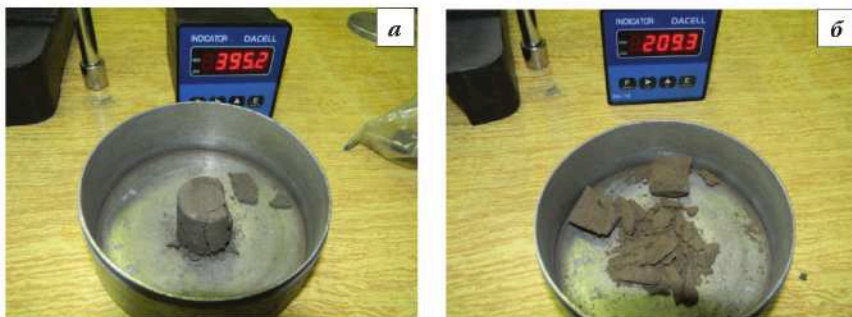


Рис. 6. Испытание брэксов на прочность: а – на сжатие (образец №1); б – на раскалывание (образец № 2)

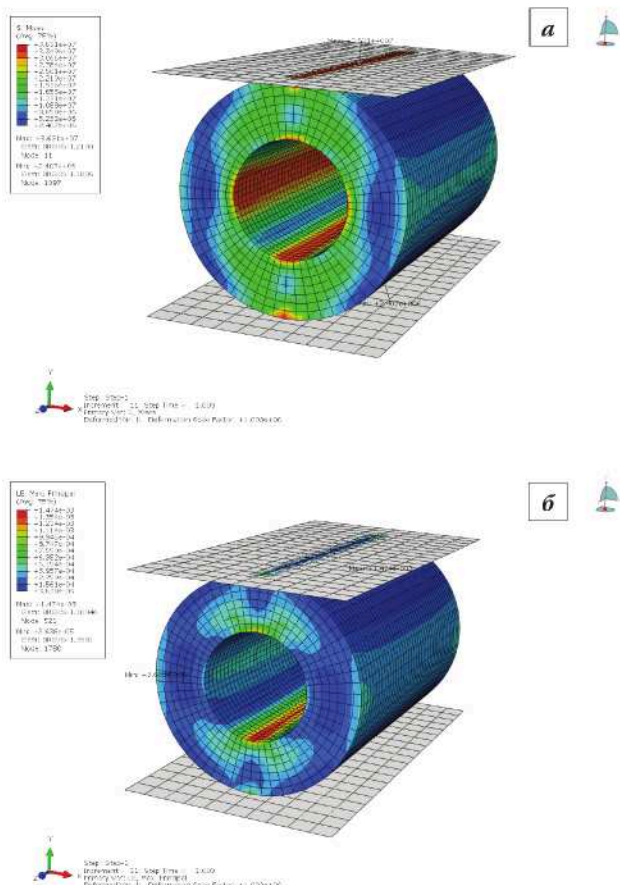


Рис. 7. Поля напряжений (а) и деформаций (б) при раздавливании полого брэкса

более вероятным (устойчивым). Для проверки предположения о том, что такая ориентация действительно будет преобладать в засыпке из брэксов овального сечения, нами было выполнено конечно-элементное моделирование распределения ориентаций таких брэксов при укладке в груду после их падения с ленты конвейера.

Была построена математическая модель процесса падения на пол 48 абсолютно жестких продуктов экструзии овального сечения при определенных предположениях о массово-инерционных характеристиках.

Поверхность пола и лента конвейера также моделируются как абсолютно жесткие тела. Брэксы имеют начальную горизонтальную скорость 0,5 м/с.

Расчет производился на основе явной схемы интегрирования с использованием решателя **Abaqus/Explicit** [4]. На рис. 3 приведена визуальная интерпретация варианта распределения ориентаций брэксов после их падения с ленты конвейера.

Анализ результатов серии расчетов показал, что 56,25% брэксов имеют ориентацию «плашмя» (длинная ось овала параллельна полу), 12,5% ориентированы длинной осью перпендикулярно полу, 12,5% стоят на основании и 18,75% на «ребре». Таким образом, нам удалось показать, что ориентацию, при которой раздавливающее усилие было бы направлено вдоль длинной оси овала, будут иметь менее 13% брэксов в штабеле. В части 1 мы показали, что для такой ориентации характерны значения прочности на раскалывание существенно меньшие, чем при ориентации «плашмя». Другими словами, придание брэксам овального сечения действительно не лишено оснований.

Параллельно с математическим моделированием (независимо) в Институте обогащения твердого топлива (ИОТТ, Будаев С.С., Николаев М.А.) были проведены сравнительные испытания прочности на раскалывание брэксов овального и круглого сечений. Образцы брэксов из торфа представлены на рис. 4. Для брэксов овального сечения характерные размеры составили: оси эллипса – 25 и 45 мм, длина – 40 мм. Цилиндриче-

Прочность брэксов на раскалывание и на сжатие

Номер образца брэкса	Состав брэкса, %	Прочность, Н/мм ²		k = раскол/сжатие
		при расколе	при сжатии	
1	Железная руда – 79, коксовая мелочь – 15, цемент – 5,55, бентонит – 0,45	20,45	40,14	1,96
2	Пыль ЭСПЦ – 84,1, коксовая мелочь – 9,35, цемент – 5,6, бентонит – 0,95	17,21	34,6	2,01
3	Железная руда – 60,75, пыль ЭСПЦ – 18,7, коксовая мелочь – 14, цемент – 5,6, бентонит – 0,95	26,27	54,3	2,07
4	Пыль ЭСПЦ – 62, окалина – 19, коксовая мелочь – 14, цемент – 5	7,01	13,4	1,91
5	Концентрат хромовой руды – 71,4, уголь – 23,8, цемент – 4,8	3,87	7,28	1,89
6	Концентрат хромовой руды – 63, уголь – 32, цемент – 5	3,29	6,53	1,98
7	Концентрат хромовой руды – 15, пыль аспирации – 67, уголь – 15, цемент – 5	3,28	6,89	2,1

ский брэкс имел диаметр 48 мм. Прочности первых на раскалывание вдоль короткой и длинной осей овала составили 5 Н на брэкс и 24 Н на брэкс соответственно. Для цилиндрического брэкса прочность на раскалывание составила 8 Н на брэкс.

Другим, немаловажным вопросом, возникающим при изучении механической прочности брэксов, является выявление взаимосвязи между прочностью на сжатие и на раскалывание. С этой целью нами были изготовлены и обработаны для испытаний образцы брэксов различных составов (см. таблицу). При этом за основу были взяты требования ГОСТ 28570–90 [5]. Образцы для одной из серии испытаний показаны на рис. 5, на рис. 6 – брэксы после испытаний образцов на сжатие и на раскалывание.

Результаты всех серий испытаний (средние значения прочности по 6–8 образцам на каждый состав брэкса и на каждый вариант нагружения) сведены в таблицу.

Конечно-элементное моделирование разрушения брэксов при различных вариантах нагружения (сжатие, раскалывание) будет проведено в дальнейшем.

Экструзионное оборудование Steele позволяет придавать не только требуемую форму сечения продуктов экструзии (овал, квадрат и т.п.), но и изготавливать их полыми внутри. Увеличение площади поверхности брэкса, достигаемое таким способом, может благоприятно сказаться на процессах металлизации брэксов. Используя возможности программного комплекса Simulia Abaqus, мы выполнили конечно-элементное моделирование раскалывания полого брэкса в сравнении с полнотелым.

В модели брэкс зажат между двумя абсолютно жесткими пластинами. Нижняя пластина ограничена по всем степеням свободы – неподвижна. К верхней пластине приложена сила, направленная вертикально вниз. Определены контактные взаимодействия между поверхностями. В расчетах использовали упруго-пластическую модель материала, полученную на основании результатов, изложенных в [6]: модуль Юнга – 30 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,3; пластичность – идеальная без упрочнения с пределом текучести 30 МПа.

Результаты моделирования показывают, что с увеличением радиуса отверстия полый брэкс становится более деформируемым. Уровни напряжений для всех расчетных случаев примерно одинаковы, однако меняется характер их распределения. Если для сплошного брэкса характерны концентрации напряжений в приповерхностных зонах контакта [1], то в полых концентраторах напряжений «распределяются» по объему и помимо зон контакта появляются также на боковой грани отверстия.

Выявленная разница может свидетельствовать о различиях в характере разрушения таких брэксов: по нашему мнению, для сплошного брэкса характерно постепенное разрушение приповерхностных зон, в то время как для полого – раскол вдоль линии максимальных растягивающих напряжений.

Заключение. Приведенные выше результаты подтверждают сделанные в части 1 работы [1] выводы о целесообразности придания брэксам овального сечения. При укладке брэксов в груду наиболее вероятной следует считать ори-

ентацию, при которой преобладающее усилие нагрузки будет направлено вдоль короткой оси овала, т.е. в направлении, в котором прочность брэкса на раскалывание имеет максимальное значение. Длина продукта экструзии при выходе из экструдера не является критическим параметром и не приводит к каким-либо неудобствам при последующем обработке брэксов и их отгрузке потребителям. Прочности брэкса на раскалывание и на сжатие имеют выраженную количественную взаимосвязь. При изготовлении полых брэксов необходимо учитывать разницу в механизмах разрушения, а значит, и в величинах прочности. Рассмотрение механизмов разрушения брэксов на основе численного и физического моделирования будет продолжено в дальнейшем.

Библиографический список

1. **Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Дуров Н.М. и др.** Исследование механической прочности брэкса. Часть 1 // *Металлург*. 2012. № 7. С. 32–35.
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. **Курунов И.Ф., Бижанов А.М., Тихонов Д.Н., Мансурова Н.Р.** Металлургические свойства брэксов // *Металлург*. 2012. № 6. С. 44–48.
4. **Электронный ресурс** <http://www.thesis.com.ru> Abaqus User Manual, Version 6.12 Documentation.
5. **ГОСТ 28570–90.** Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций.
6. **Meyers M.A., Meyers P.P.** Compressive strength of iron-ore agglomerates // *Transactions of Society of Mining Engineers AIME*. 1983. Vol. 274. P. 1875–1884.

INVESTIGATION OF MECHANICAL STRENGTH OF BREX. Part 2

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

Various aspects of the brex mechanical strength have been investigated. We have simulated via finite elements modeling the breakdown of the brex after the exit from the die. Mathematical model of the brex stockpiling had been constructed allowing to show the statistics of the brex orientation in the pile. Strength testing confirmed previously made conclusions on the oval-shaped brex compressive and tensile splitting strength. Quantitative relation between these types of the strength for brex has been established. The comparison has been made between different scenarios of the destruction of hollow and round brex.

Keywords: extruded briquette (BREX); product of extrusion; stiff vacuum extrusion; mechanical strength; finite elements method, compressive strength, tensile splitting strength.

ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ

На Качканарском ГОКе (предприятие Evraz plc) состоялся запуск в опытно-промышленную эксплуатацию экскаватора ЭКГ-12А, изготовленного на Уралмашзаводе

Экскаватор ЭКГ-12А – это уже вторая машина, поставленная Уралмашзаводом Качканарскому ГОКу в рамках технического перевооружения горного комбината. Первый экскаватор работает в забое предприятия пять месяцев и вышел на запланированный уровень добычи.

В новых машинах, поставленных Качканарскому ГОКу, воплощены все современные разработки уралмашевских конструкторов, которые позволяют увеличить ресурс работы новых экскаваторов, предотвратить поломки оборудования и сделать работу машинистов более удобной. Экскаваторы оснащены информационной системой и системой автоматических защит, эргономичной кабиной, системой электропривода со статическими преобразователями. По просьбе заказчика на новой машине установлен модернизированный редуктор подъемной лебедки, улучшена обзорность из кабины машиниста.

Запуск в опытно-промышленную эксплуатацию новой машины был приурочен к 49-летию Качканарского ГОКа. Сразу после торжественной церемонии пуска экскаватор приступил к работе: менее чем за две минуты он загрузил рудой кузов 130-тонного самосвала. В ближайшие месяцы машина должна выйти на уровень добычи 200–240 тыс. т руды в месяц.

Представители Уралмашзавода и Качканарского ГОКа ведут разработку программы дальнейшего сотрудничества на ближайшие годы.

ОАО «Уралмашзавод» – один из лидеров российского рынка оборудования для металлургии, горнодобывающей, нефте- и газодобывающей промышленности, промышленности строительных материалов и энергетики. Стратегия развития компании предусматривает создание машиностроительного предприятия мирового уровня, которая сможет комплексно обеспечивать потребности заказчиков в оборудовании.

На Уралмашзаводе при поддержке основного акционера – Газпромбанка – разработана и реализуется инвестиционная программа, предусматривающая коренную реконструкцию всех производств: металлургического, кузнечно-прессового, сварочного, механосборочного.

Дирекция по информационной политике ОАО ОМЗ