

УДК 669.162:520.178.4/6

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ БРЭКСА ПРИ СТАТИЧНОЙ И УДАРНОЙ НАГРУЗКАХ

© **Бижанов Айтбер Махачевич**<sup>1</sup>, e-mail: abizhanov@jcsteele.com;**Курунов Иван Филиппович**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф., e-mail: kurunov\_if@nlm;**Подгородецкий Геннадий Станиславович**<sup>3</sup>, канд. техн. наук; **Нуштаев Дмитрий Владимирович**<sup>4</sup><sup>1</sup> J.C.Steele&Sons, Inc.USA, Statesville, NC.<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 02.06.2014 г.

Методами физического и численного экспериментов изучен механизм трещинообразования и разрушения экструзионного брикета (брэкса) при различных вариантах нагружения. Показано, что при статической нагрузке растяжения (при раскалывании) разрушение брэкса начинается в его центральной части и является результатом растягивающих напряжений. Математическое моделирование, основанное на методике с использованием когезивных поверхностей, хорошо согласуется с результатами физического эксперимента. Приводятся результаты моделирования разрушения брэкса при падении с высоты 1,5 м.

**Ключевые слова:** брикет экструзии (брэкс); жесткая вакуумная экструзия; механическая прочность; разрушение; моделирование; когезивные поверхности.

**Б**рикет от его создания и до ввода в качестве компонента в шихту металлургической печи проходит это испытание на прочность. Окускованный продукт подвергается ряду механических воздействий: ударно-истирающих, динамических и раздавливающих нагрузок при конвейерной транспортировке на хранение, штабелирование, а также при погрузке в вагоны и подаче в приемные бункеры печей. После таких воздействий брикет должен сохранить форму и требуемые металлургические свойства, оправдывающие затраты на его изготовление и хранение и не ухудшающие показатели металлургического процесса, в котором он используется.

В настоящее время для количественного определения механической прочности металлургических брикетов широко применяются методики, создававшиеся для окускованных продуктов совершенно иного типа – топливных (угольных) брикетов, агломерата и обожженных окатышей. Весьма часто применяют также методики, повторяющие процедуры определения механической прочности кускового кокса и бетона. В нашей работе мы применяли методику испытания на прочность при растяжении, основанную на ГОСТ 28570–90 (Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций) и

ГОСТ 10180–90 (Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам).

Вместе с тем понятно, что сам механизм упрочнения холодного брикета существенно отличается от механизма упрочнения агломерата и окатышей в процессе температурной обработки, что, вообще говоря, не позволяет корректно сравнивать параметры прочности этих окускованных продуктов.

Кроме того, само понятие механической прочности столь многоаспектно, что едва ли может быть полно описано показаниями прибора, моделирующего идеализированный случай ее проявления (одноосное сжатие, раздавливание на раскалывание и т.д.). Знание только величины максимального напряжения, которое может выдержать брикет при том или ином способе приложения нагрузки не позволяет раскрыть механизм его упрочнения и динамику реакции на такое воздействие. На прочность брикета значительно влияет влажность шихты, гранулометрический состав смеси (крупность частиц) и форма частиц материала, тип и количество применяемого связующего, размер и форма сечения брикета, способ приложения внешней нагрузки. В зависимости от способа подготовки шихты брикеты, изготовленные из одного и того же сырья и имеющие одина-

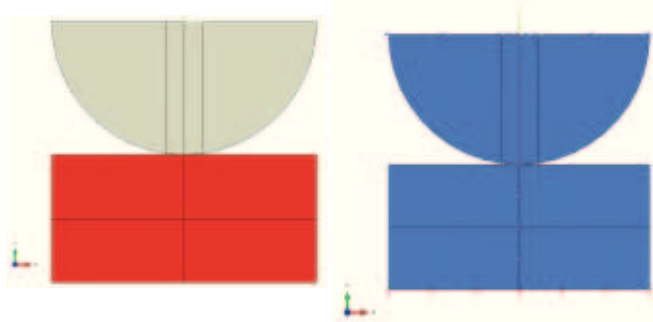


Рис. 1. Постановка задачи (серый цвет – брикет; красный – стальная плита) – слева; область приложения внешнего давления – справа

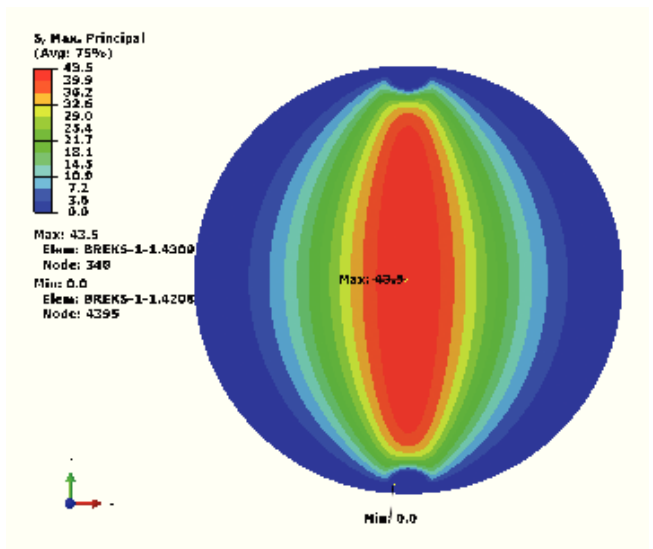


Рис. 2. Визуализация максимальных главных напряжений (МПа)

ковый компонентный состав, могут по-разному выдерживать прикладываемую нагрузку, разрушаясь хрупко или вязкопластично.

В ситуации отсутствия унифицированной методики испытаний металлургических брикетов на механическую прочность и низкой информативности таких методик в принципе, на наш взгляд, полезно применение методов математического моделирования поведения брикетов под действием внешней нагрузки в сочетании с моделированием физическим. Именно такой подход позволяет лучше понимать и количественно оценивать, процессы, происходящие в брикете под нагрузкой. Только после выяснения характера отклика брикета на то или иное воздействие, природы его разрушения (хрупкого или вязкого) можно переходить к разработке методики его испытаний в производственных условиях. Ранее нами были рассмотрены с этих позиций некоторые аспекты механической прочности брикетов, полученных экструзией [1].

Если понимать под прочностью брикета его способность выдерживать без разрушения меха-

нические нагрузки, которым он подвергается, то необходимо понимание механизма разрушения брикета. В настоящей работе мы рассматриваем внешнюю нагрузку двух типов – статическую и динамическую (ударную). При этом нагрузки первого типа соответствуют раздавливающим (сжимающим) усилиям, которым брикеты подвергаются в бункерах или штабелях на складах и при перевозке в вагонах. Ударная нагрузка соответствует укладке брикетов в штабель либо иным погрузочно-разгрузочным операциям, при которых брикеты падают с высоты. Действие истирающих нагрузок, которое преимущественно проявляется на разрушенных брикетах, в этой работе не рассматривается.

Построение математической модели разрушения брикета при сжимающей нагрузке сводится к изучению трещинообразования при действии раскалывающей нагрузки на брикет. Моделирование производится в осесимметричной постановке (рис. 1).

Расчетное давление прикладывается к нижней поверхности плиты и передается на брикет через контактное взаимодействие. Таким образом моделируется раскалывающее сжатие брикетана настольной одноколонной электромеханической испытательной машине Instron 3345 (США) – наиболее часто применяемой для механических испытаний [2].

На начальном этапе производится моделирование сжатия брикета без учета трещинообразования. Для брикета, как и для плиты, используется упругая модель материала. В расчетах приняты следующие значения прочностных свойств стали и брикета (взяты из работы [3]): для стали модуль Юнга 210 000 МПа, коэффициент Пуассона 0,3; для брикета модуль Юнга 70 000 МПа, коэффициент Пуассона 0,2. К нижней поверхности стальной плиты прикладывается давление 6,86 МПа. Для расчетов напряженно-деформированного состояния использовали метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в программном комплексе SIMULIA Abaqus.

На рис. 2 показаны максимальные главные напряжения в модели. Центральная часть брикета подвержена растягивающим усилиям, что может привести к образованию трещин в областях концентраций растягивающих напряжений. Зона максимальных главных напряжений локализована в центральной части брикета (43,5 МПа при внешнем давлении 6,86 МПа).

Для моделирования трещинообразования брикета использовали методику когезивных по-

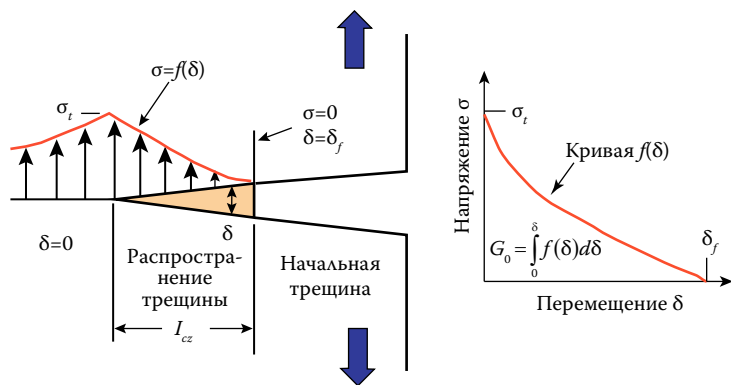


Рис. 3. Схема реализации методики когезивных поверхностей

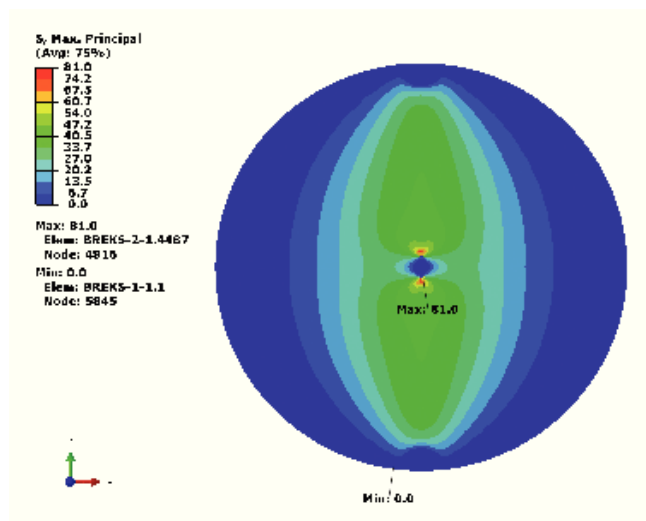


Рис. 4. Область зарождения трещины

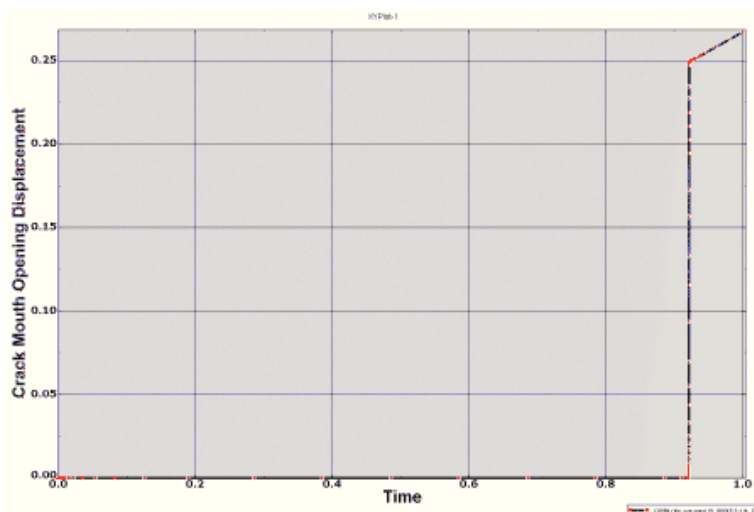


Рис. 5. График раскрытия трещины

верхностей [4]. Эта методика применяется при моделировании образования трещин в таких материалах, как бетон, керамика, металлы, полимеры, а также в ситуациях, когда моделируется сопряжение («склейка») различных конструктивных элементов. Процесс реализации методики когезивных поверхностей схематически показан на

рис. 3. Когезивная трещина инициируется в момент достижения главных напряжений уровня предела прочности материала. В модели образовавшаяся трещина ориентирована перпендикулярно направлению действия главных напряжений в модели. После образования трещины усилия между сопряженными поверхностями передаются согласно выбранному закону  $f(\delta)$ . Трещина считается полностью раскрытой (сопряженные поверхности не оказывают влияния друг на друга) при достижении критического размера разделения  $\delta(f)$  (см. рис. 3). Исходя из распределения главных напряжений очевидно, что возникновение и распространение трещины в бездефектном материале может происходить вдоль центральной осевой линии, перпендикулярно направлению действия главных напряжений (рис. 4).

Результаты моделирования показали, что образование трещины действительно происходит в центральной части брикета с последующим распространением в радиальном направлении параллельно направлению действующей нагрузки. К аналогичным выводам в приложении к разрушению окатыша приходят и авторы работ [5, 6]. На рис. 5 представлен график изменения расстояния между двумя центральными точками трещины (график раскрытия трещины). Иницирование трещины происходит в момент времени  $t_0 = 0,921617$  с, раскрытие при  $t_\phi = 0,924073$ . Исходя из условия линейного возрастания внешнего давления путем расчета нетрудно показать, что начало трещинообразования соответствует критической нагрузке 6,32 МПа. Рис. 6 иллюстрирует раскрытие трещины при нагрузке 6,73 МПа.

Величина критической нагрузки и форма развития трещины хорошо согласуются с данными, полученными при физическом моделировании разрушения брикета 5,88–6,86 МПа. Образцы брикетов были нарезаны на одинаковые сегменты (длиной, равной двум диаметрам). После чего торцевую поверхность зашлифовывали до создания гладкой ровной поверхности. Подготовленные образцы подвергали нагрузке в диапазоне от 1,96 до 9,8 МПа на ручном прессе

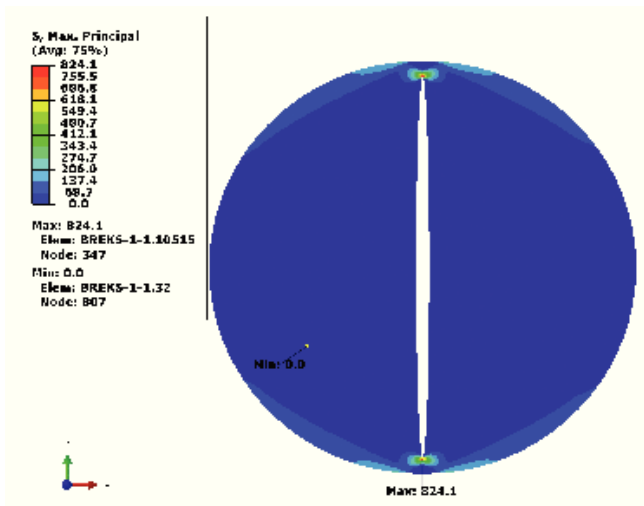


Рис. 6. Визуализация раскрытия трещины при нагрузке 6,73 МПа

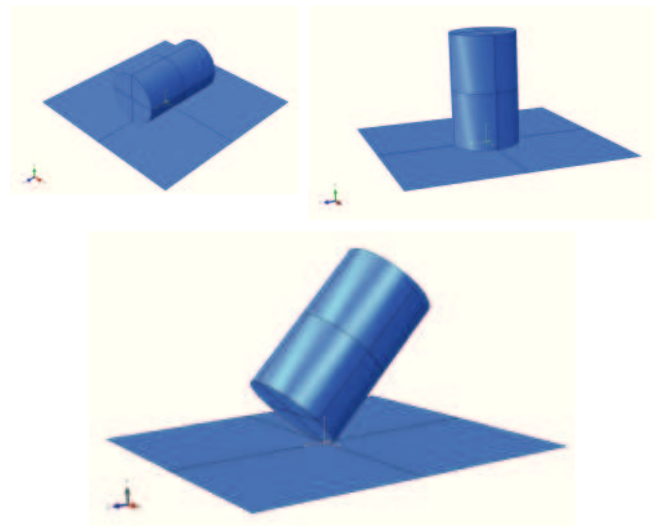


Рис. 8. Варианты падения брэкса на плоскость

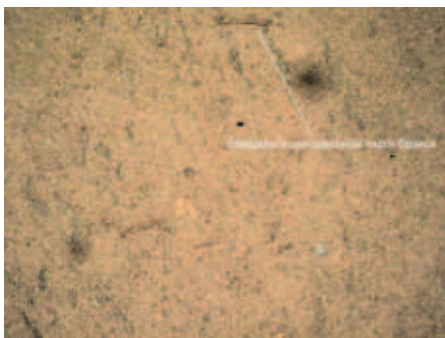


Рис. 7. Трещинообразование в центральной части брэкса

с *s*-образным тензодатчиком. Разрушение образцов брикетов происходило при средней нагрузке 6,8 МПа. Трещинообразование изучали с помощью оптического микроскопа Leica DM ILM. Осмотр образцов показал, что изначально трещины образуются в точке приложения усилия, однако при увеличении нагрузки дальнейший рост трещин на периферии образца не наблюдается (рис. 7). При достижении значений усилия в интервале 5,8–6,8 МПа трещины образуются в центральной части брэкса. Такое удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных подтверждает применимость разработанной методики к расчету прочностных свойств брикетов.

Для моделирования процесса разрушения брикетов при ударной нагрузке рассматривали падение брикетов на абсолютно жесткую плоскую поверхность с высоты 1,5 м.

Исследовали варианты падения брэкета цилиндрической формы: на боковую поверхность, на торцевую поверхность и на грань (рис. 8).

Моделирование проводили в рамках упруго-пластической модели поведения брэкета с возможностью его разрушения в рамках про-

граммного комплекса SIMULIA Abaqus. Физико-механические параметры материала были получены в результате обработки экспериментальных данных образцов брикетов следующего состава, мас. %: хромоворудный концентрат 15; уголь 15; пыль аспирации производства феррохрома 67; портландцемент 3. В физическом эксперименте на настольной одноколонной электромеханической испытательной машине Instron 3345 (США) с нагружающей способностью 5 кН были определены следующие свойства материала: модуль Юнга 123 МПа, коэффициент Пуассона 0,3; предел прочности 2,1 МПа. Результаты моделирования приведены на рис. 9–14. Для сравнения параметра повреждаемости приведены также результаты для случая падения брикетов с высоты 0,5 м. Под параметром повреждаемости понимается условная величина, характеризующая степень поврежденности материала (0 – для неповрежден-

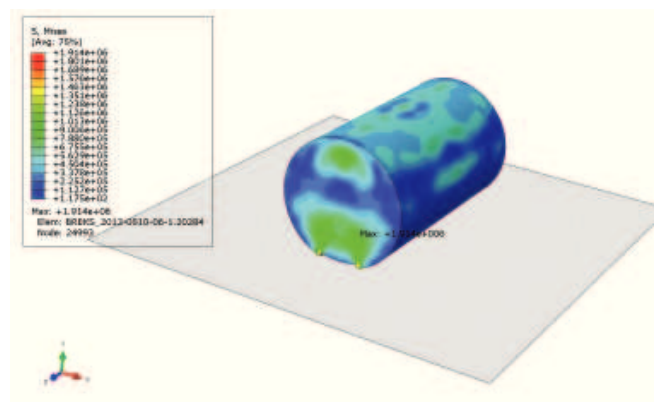


Рис. 9. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в брэкете цилиндрической формы. Тип удара: боковая поверхность; высота падения 1,5 м



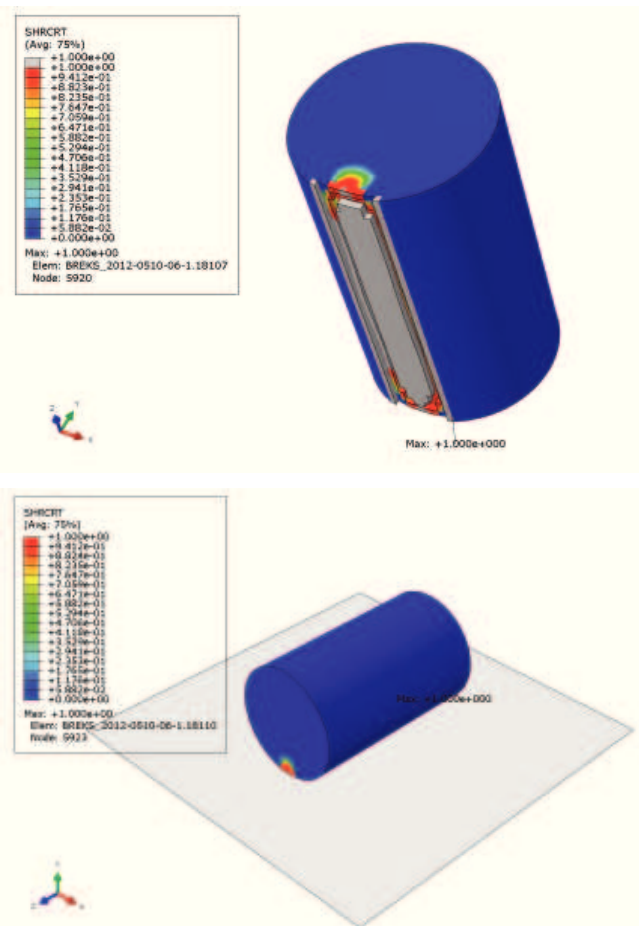


Рис. 10. Распределение параметра повреждаемости в брикете цилиндрической формы. Тип удара: боковая поверхность; высота падения – 1,5 м (а) и 0,5 м (б)

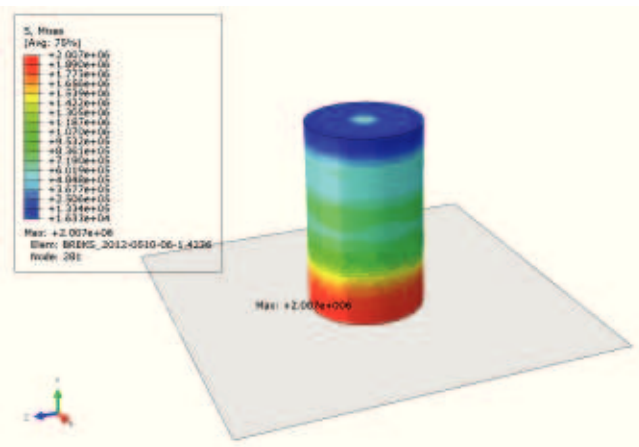


Рис. 11. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в брикете цилиндрической формы. Тип удара: торец; высота падения – 1,5 м

ного, 1 – для полностью разрушенного).

В приведенных расчетных случаях в теле брикета наблюдаются области необратимых (неупругих) деформаций в зоне контактных взаимодействий.

Падение с высоты 0,5 м приводит к полному

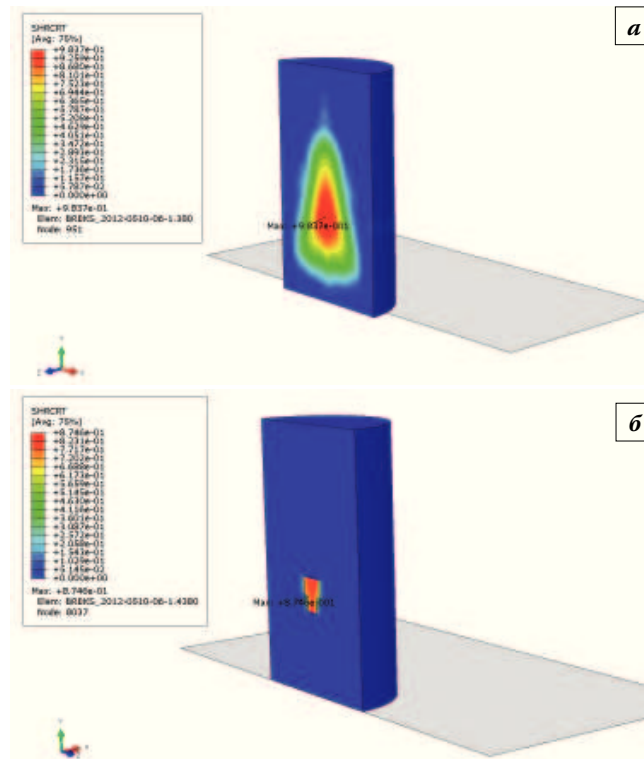


Рис. 12. Распределение параметра повреждаемости в брикете цилиндрической формы. Тип удара: торец; высота – 1,5 м (а) и 0,5 м (б)

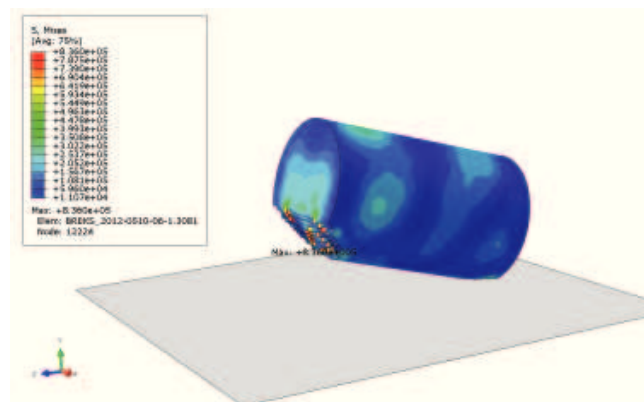


Рис. 13. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в брикете цилиндрической формы. Тип удара: грань; высота падения – 1,5 м

разрушению кромки брикета только в случае его падения на грань. Это объясняется малой площадью контактных взаимодействий и, как следствие, более высокой степенью и уровнем механических напряжений в модели. В остальных расчетных случаях падение приводит к необратимой деградации прочностных параметров брикета в зоне контакта без наступления прогрессирующего разрушения элементов.

При падении с высоты 1,5 м наблюдается разрушение тонких приповерхностных слоев брикета практически во всех расчетных случаях. Сто-

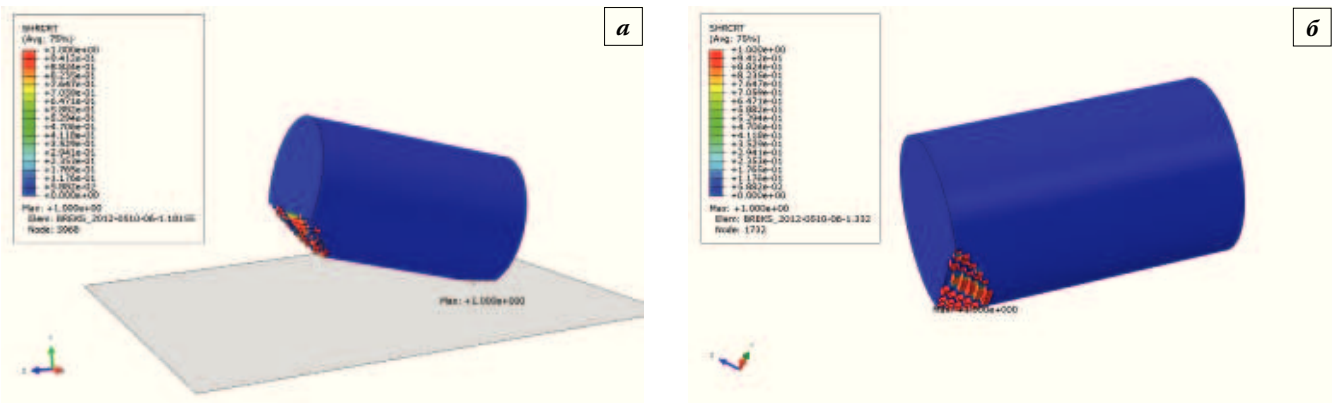


Рис. 14. Распределение параметра повреждаемости в брикете цилиндрической формы. Тип удара: грань; высота падения – 1,5 (а) и 0,5 м (б)

ит отметить, что при падении брикета на торец (см. рис. 12) наблюдается локализация параметра повреждаемости в центре брикета (без разрушения). Этот факт объясняется интерференцией волн сжатия–растяжения в модели при ударе.

В проведенной работе использовали один критерий разрушения – предел прочности при сжатии. Для получения более достоверных результатов моделирования процесса разрушения необходимо получение дополнительных сведений о характере разрушения материала при растяжении и чистом сдвиге. Введение этих параметров в управляющую модель может существенным образом изменить картину разрушения.

**Заключение.** Примененная методика математического моделирования процесса разрушения брикета при статической и оригинальной (ударной) нагрузке позволяет получать адекватное результатам физического эксперимента представление о механизме разрушения брикетов и прогнозировать ударную прочность брикета при его падении.

**Библиографический список**

1. **Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Дуров Н.М. и др.** Исследование механической прочности брэкса. Ч. 1, Ч. 2 // *Металлург.* 2012. № 7. С. 32–35; № 10. С. 36–40.
2. **Зуев А.Б., Данилов В.И.** Физические основы прочности материалов. Долгопрудный: ИД Интеллект, 2013. 376 с.
3. **Gustafsson G.** Mechanical characterization and modeling of iron ore pellets. May 2012 Luleå: Luleå tekniska universitet. (Doctoral thesis / Luleå University of Technology). Paper E, 20 p.
4. **Williamson R.L., Knoll D.A.** Simulating Dynamic Fracture in Oxide Fuel Pellet Using Cohesive Zone Models. Proc. 20th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology SMiRT 20 (Espoo, Finland. August 9–14, 2009). Paper 1775.
5. **Meysers M.A., Meysers P.P.** Compressive strength of iron-ore agglomerates // *Trans. of Society of Mining Engineers AIME.* 1983. Vol. 274. P. 1875–1884.
6. **Смагина А.В., Коровушкин В.В., Подгородецкий Г.С. и др.** Исследование механизма разрушения окатышей под действием внешних нагрузок // *Изв. вузов: Черная металлургия.* 2013. № 7. С. 9–14.

**INVESTIGATION OF THE BREX DESTRUCTION MECHANISM UNDER STATIC AND IMPACT LOAD**

© **Bizhanov A.M.; Kurunov I.F.,** Dr Sci. (Eng.), prof.; **Podgorodetskiy G.S.,** Cand. Sci. (Eng.); **Nushtaeв D.V.**

Physical and numerical simulations were applied for the investigation of the crack generation process in the body of the extrusion briquette (Brex) under the various scenarios of the external load. It has been confirmed that under the static external tensile splitting load conditions the crack generates in the Brex central zone in the result of the splitting strain. Results of the mathematical simulation based on cohesive zone modeling technique are in a good agreement with the results of physical experiment. The results of modeling of the Brex destruction after falling from the height of 0.5 and 1.5 meters are represented.

**Keywords:** extrusion briquette (Brex); stiff vacuum extrusion; mechanical strength; destruction; crack formation; modelling; cohesive zone.