

3. Эффективность деформации сортовых профилей / С.А. Тулупов, Г.С. Гун, В.Д. Онискив и др. – М.: Металлургия, 1990. – 280 с.
4. Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Гун Г.С. Деформация металла в многовалковых калибрах. – М.: Металлургия, 1979. – 240 с.
5. Прокатка малопластичных металлов с многосторонним обжатием: Учебное пособие для вузов / Л.А. Барков, В.Н. Выдрин,

- В.В. Пастухов, В.Н. Чернышев. – Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1988. – 304 с.
6. Колмогоров В.Л. Механика ОМД. – М.: Металлургия, 1986. – 687 с.

© 2013 г. В.А. Харитонов, И.В. Таранин
Поступила 26 июня 2012 г.

УДК 621.926.2

А.Г. Никитин, Ю.А. Епифанцев, С.А. Лактионов, А.В. Витушкин

Сибирский государственный индустриальный университет

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СИЛУ ДРОБЛЕНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ*

Аннотация. Проведен полнофакторный эксперимент по разрушению образцов из хрупкого материала. Показано влияние различных факторов и их взаимодействие на силу, необходимую для разрушения образцов, а также взаимосвязь этих факторов с величиной относительной деформации при разрушении. Даны рекомендации по выбору конструктивных параметров щековых дробилок.

Ключевые слова: хрупкий материал, разрушение, относительная деформация, скорость деформации, напряжение.

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING STRENGTH OF FRAGILE MATERIALS FRAGMENTATION

Abstract. Full-factor experiment of samples fragmentation made from fragile material is carried out. The influence of various factors and their interaction on the force necessary for samples fragmentation and the interconnection of these factors with magnitude of relative deformation at the fragmentation is shown. The recommendations for choice of parameters for jaw crushers are given.

Keywords: brittle material, destruction, relative strain, strain velocity, tension.

Расход энергии на дробление различных материалов составляет большую (до 5 %) долю в энергетическом балансе мира [1]. Многие промышленные производства (металлургические, горные и другие) перерабатывают в больших количествах сыпучие материалы различных классов крупности. В большинстве случаев нужна крупность достигается измельчением кусков на дробилках. Наиболее часто в промышленности используются щековые дробилки.

При создании новых дробильных машин или их совершенствовании необходимо иметь точные представления о процессе дробления. Для определения силы дробления для прочностного расчета деталей дробилки и теоретического выбора мощности электродвигателя необходимо учитывать по возможности все факторы, влияющие на нее.

При дроблении в щековых дробилках куски материала испытывают весь спектр деформаций (сжатие, изгиб, растяжение), но основным разрушающим видом нагрузки является напряжение растяжения, возникающее при раскалывании куска материала [2].

Цель настоящей работы – определение комплексного влияния на силу дробления прочности материала,

вида деформации материала и скорости приложения внешней силы. Последний фактор вызывает особый интерес, так как в объеме камеры дробления он характеризуется переменными значениями, а в литературных источниках не нашел отражения.

Эксперимент проводили на универсальной испытательной машине ИК-500.01, позволяющей в непрерывном режиме фиксировать силу давления на образец и его абсолютную деформацию, а также проводить видеозапись процесса разрушения.

Поскольку практически невозможно подобрать рудные куски с одинаковыми свойствами даже с одного месторождения, для чистоты эксперимента образцы кубической формы (40×40×40 мм) изготавливали из цементно-песчаной смеси при соотношении содержаний 1:1 и 1:2. Таким образом обеспечивали прочность материала образцов на двух уровнях.

Как показал предварительный эксперимент, вид деформации определяется характером контакта образца с рабочими поверхностями испытательной машины. При плоском контакте кубический образец испытывает деформацию сжатия (рис. 1, а), при линейном контакте по ребру кубика наблюдается деформация растяжения (рис. 1, б). При начальном точечном контакте такого образца (приложение нагрузки к вер-

* Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом Министерства образования и науки № 7.4662.2011.

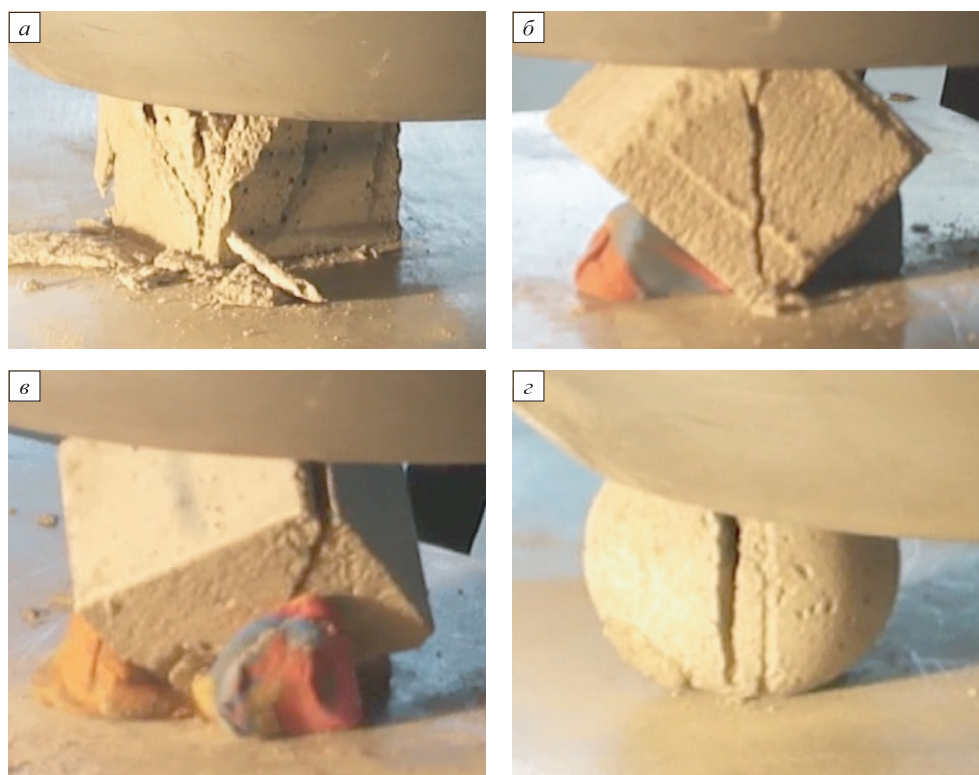


Рис. 1. Характер разрушения образцов:

a – плоский контакт; *б* – линейный контакт; *в* и *г* – точечный контакт

шинам диагонально расположенных вершин кубика) также наблюдается появление продольной трещины, дальнейшее разрушение образца идет за счет деформации растяжения (рис. 1, в). Аналогичный процесс наблюдается и при разрушении дополнительно изготовленных сферических образцов (рис. 1, г). В последующем эксперименте деформацию задавали двумя видами контакта: плоским (деформация сжатия) и линейным (деформация растяжения).

Для определения влияния изучаемых факторов (порознь и совместно) на силу разрушения образца (F) исследование проведено по полному факторному рандомизированному плану типа 23 [3]. Исследуемые факторы и их уровни варьирования приведены ниже:

Исследуемый фактор	Верхний уровень (+)	Нижний уровень (–)
Скорость нагружения, кН/с	10	1
Материал	Смесь 1:1	Смесь 1:2
Вид деформации	Сжатие	Растяжение

После статистической обработки результатов опытов получено уравнение регрессии

$$F = 7,93 + 0,32X_1 + 3,6X_2 + 4,51X_3 + 0,48X_1X_3 + 1,87X_2X_3,$$

где $X_1 = \frac{\tilde{X}_1 - 5,5}{4,5}$ – кодированное значение количественного фактора скорости нагрузки; $\tilde{X}_1$ – натуральное

значение фактора скорости нагрузки; X_2 и X_3 – кодированные значения качественных факторов прочности материала и вида деформации (+1 или –1).

Проверка по критерию Фишера показала, что предлагаемое уравнение регрессии адекватно описывает результаты эксперимента при 5 %-ом уровне значимости [$G_{\text{эксп}} = 0,3549$; $G_{0,05}(1, 8) = 0,680$; $S_{\text{воспр}}^2 = 0,1364$; $S_{\text{ад}}^2 = 0,3104$; $F_{\text{эксп}} = 2,276$; $F_{0,05}(2, 8) = 4,46$].

Знаки уравнения регрессии показывают, что сила разрушения образца возрастает с увеличением скорости нагрузки, прочности материала и при переходе от деформации растяжения к деформации сжатия (от линейного контакта к плоскому).

Анализ коэффициентов факторов в уравнении при расчетном доверительном интервале $\pm 0,301$ показывает малозначимость в исследуемом диапазоне скорости нагружения (X_1) и взаимодействия факторов скорости нагружения и вида деформации (X_1X_3). Значимыми факторами являются прочность материала образца (X_2), вид деформации (X_3) и их взаимодействие (X_2X_3).

На рис. 2 показан характер изменения величины прикладываемой к образцу силы до момента начала его разрушения в функции относительной деформации для различных уровней исследуемых факторов. В исследуемых интервалах варьирования рассмотренных факторов максимальные значения нормального напряжения сжатия достигают 10,4 МПа, напряжения растяжения – 2,1 МПа.

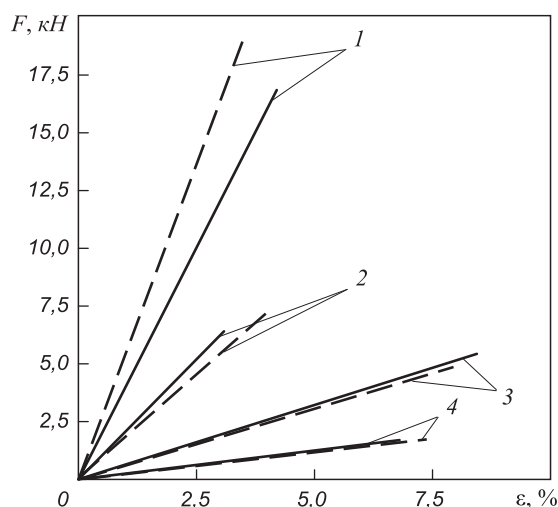


Рис. 2. Характер изменения силы разрушения образца в функции его относительной деформации при скорости нагружения 1 кН/с (—) и 10 кН/с (---) при различных видах контакта: 1 и 2 – плоский контакт, смесь 1:1 и смесь 1:2; 3 и 4 – линейный контакт, смесь 1:1 и смесь 1:2

На рис. 3 представлены зависимости скорости нагружения образца на силу его разрушения при различных уровнях рассматриваемых факторов. При плоском контакте (деформация сжатия) с ростом скорости приложения нагрузки наблюдается малое увеличение разрушающей силы. Линейный контакт (деформация растяжения) приводит к небольшому снижению разрушающей нагрузки.

По результатам этого же полнофакторного эксперимента определено влияние исследуемых факторов на величину относительной деформации ε образцов, соответствующей максимальной силе их разрушения. Полученное уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$\varepsilon = 5,65 - 1,89X_3.$$

Уравнение адекватно описывает результаты эксперимента по критерию Фишера при 5 %-ом уровне значимости [$G_{\text{эксп}} = 0,2486$; $G_{0,05}(1, 8) = 0,680$; $S^2_{\text{воспр}} = 0,596$; $S^2_{\text{ад}} = 0,899$; $F_{\text{эксп}} = 1,508$; $F_{0,05}(6, 8) = 3,58$].

Анализ этого уравнения показывает, что при доверительном интервале $\pm 0,629$ относительная деформация зависит только от вида контакта образца. При плоском контакте относительная деформация имеет наименьшую величину и составляет 3,76 %. С переходом на линейный контакт относительная деформация увеличивается в два раза (до 7,54 %).

На сферических образцах относительная деформация 3,94 % при максимальной силе разрушения оказалась соизмеримой с относительной деформацией при разрушении кубического образца при плоском контакте. При разрушении же кубического образца с первоначальным точечным контактом относительная деформация возросла до 13,22 %. При дроблении в щековой дробилке такой первоначальный вид контакта куска

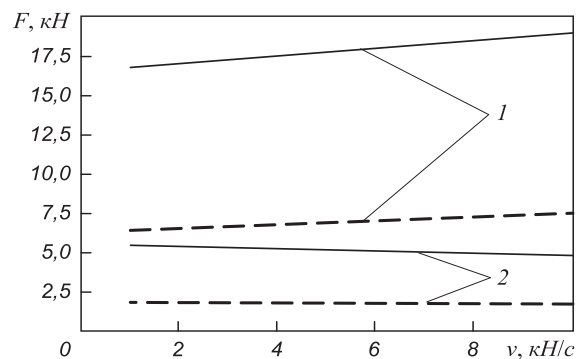


Рис. 3. Зависимость величины разрушающей силы от скорости приложения нагрузки при плоском (1) и линейном (2) контакте: — — смесь 1:1; --- — смесь 1:2

материала с щекой практически не встречается, так как происходит либо его внешнее обмятие, либо переориентация с переходом в плоский или линейный контакт.

В дробилках с простым движением щеки для обеспечения максимальной производительности верхней части камеры дробления рекомендуется ход сжатия на уровне приемного отверстия, составляющий 3 % от его ширины [2]. Однако полученные в настоящем эксперименте данные показывают, что такой величины хода недостаточно для устойчивого разрушения кусков материала при любом виде контакта, при этом куски материала на первых ходах подвижной щеки подвергаются лишь внешнему обмятию. Таким образом, для устойчивого процесса разрушения при первых ходах щеки необходимо иметь относительную величину сжатия не менее 7 %.

Выводы. Установлена математическая зависимость между силой дробления, прочностью материала, видом его деформации и взаимодействием двух последних факторов, показывающая значимое возрастание силы дробления при увеличении этих факторов. Скорость приложения внешней нагрузки мало сказывается на процессе разрушения куска дробимого материала. Для увеличения производительности в верхней части камеры дробления щековой дробилки с простым качанием щеки следует выбирать ход щеки на уровне линии контакта наибольшего рекомендуемого размера куска в питании, обеспечивающий относительную величину сжатия не менее 7 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
2. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / Ю.Э. Аккерман, Г.Б. Букаты, Б.В. Кшевальтер и др.; под общ. ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского. – М.: Недра, 1982. – 366 с.
3. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Металлургия, 1968. – 158 с.

© 2013 г. А.Г. Никитин, Ю.А. Елифанцев,
С.А. Лактионов, А.В. Витушкин
Поступила 4 сентября 2012 г.