УДК 539.3

В. П. ПОШИВАЛОВ

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ РАБОТЫ РАЗРУШЕНИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ

Проведен анализ математических законов измельчения горных пород Риттингера, Кирпичева–Кика и Бонда, описывающих взаимосвязь между энергией, затрачиваемой при измельчении, и линейными размерами измельченного куска породы. Показано, что недостатком формул, описывающих эти законы, является то, что в них присутствуют неизвестные коэффициенты пропорциональности, для которых не разработана методика их определения. Предложено определять работу разрушения при измельчении на основе формул механики твердого деформированного тела. Получены зависимости предела прочности и работы разрушения от степени измельчения и зависимость работы разрушения от удельной поверхностной энергии разрушения каменного угля при различных значениях удельной поверхностной энергии разрушения.

Проведено аналіз математичних законів здрібнювання гірських порід Риттингера, Кирпичьова–Кика та Бонда, що описують взаємозв'язок між енергією, затрачуваною при здрібнюванні, і лінійними розмірами здрібненого шматка породи. Показано, що недоліком формул, які описують ці закони, є те, що в них присутні невідомі коефіцієнти пропорційності, для яких не розроблено методику їх визначення. Запропоновано визначати роботу руйнування при здрібнюванні на основі формул механіки твердого деформованого тіла. Отримано залежності границі міцності і роботи руйнування від ступеня здрібнювання та залежність роботи руйнування від питомої поверхневої енергії руйнування кам'яного вугілля при різних значеннях питомої поверхневої енергії руйнування.

Mathematical Rittinger, Kirpichev-Kick and Bond laws for relations of crushing energy and linear sizes of a crushed piece of rock are analyzed. It is found that the disadvantage of the formulae describing these laws is in unknown coefficients of proportionality without developing the corresponding technique of their determination. It is proposed to measure crushing work for grinding using formulae of the mechanics of rigid deformable bodies. Dependencies of ultimate strength and crushing work on an index of size reduction and those of crushing work on specific surface energy of coal crushing under various values of specific surface energy are derived.

***Ключевые слова**: удельная работа разрушения, измельчение горных пород, энергия разрушения, степень измельчения, предел прочности.*

Введение. Украина испытывает серьезный дефицит нефти и природного газа, запасы которых в стране весьма ограничены.

В структуре запасов энергоносителей Украины на уголь приходится больше 95 %, что определяет его роль в развитии не только энергетики, но и экономики в целом.

Одним из путей решения проблемы энергетической безопасности страны может быть расширение сферы использования в теплоэнергетике собственного угля и высокозольных отходов (флотохвостов, шламов и т. д.) с применением новых технологий.

В настоящее время рассматриваются несколько вариантов использования альтернативных топлив в Украине, причем на передний план выходит задача замены газа и мазута при производстве тепла и электроэнергии на водоугольное топливо.

Для решения этой важной народно-хозяйственной проблемы в Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины создана кавитационно-импульсная установка для приготовления тонкодисперсного водоугольного топлива, позволяющая получить продукт для прямого сжигания в тепловых котлах.

В связи с проведением работ по разработке кавитационно-импульсной технологии приготовления тонкодисперсного водоугольного топлива была поставлена задача определения энергии разрушения каменного угля при его

дроблении до дисперсного состояния.

Постановка задачи. Каменный уголь относится к осадочным органогенным горным породам и является анизотропным твердым телом, которое обладает большим сопротивлением деформации сжатия.

Работа, которую необходимо затратить для разрушения горной породы, зависит от очень многих факторов, связанных с параметрами нагрузки, физико-механическими свойствами, размерами разрушаемого материала, способами разрушения, а также коэффициентом передачи энергии от разрушающего инструмента к породе. Суммарное действие этих факторов определяет, в конечном счёте, работу, необходимую для разрушения.

В соответствии с теорией разрушения, процесс деформирования твердых тел заключается в том, что под действием внешних сил в наиболее слабых местах тела образуются замкнутые или начинающиеся на поверхности мельчайшие трещины. Если тело подвергается лишь упругой деформации, то при прекращении внешнего воздействия трещины под действием молекулярных сил могут смыкаться и происходит процесс «самозаживления». Разрушение твердого тела происходит лишь в том случае, когда трещины настолько увеличиваются, что пересекают тело по всему его сечению в одном или в нескольких направлениях. В момент разрушения деформирующегося тела напряжение в нем превышает некоторое предельное значение, упругая деформация сменяется деформацией разрушения и происходит измельчение.

Процессы дробления и измельчения горных пород связаны со значительным расходом энергии на образование новых поверхностей, на преодоление внутреннего трения частиц при их деформации во время разрушения.

Теория процесса измельчения устанавливает зависимость между энергией, затраченной на измельчение твердого тела, и результатом измельчения, т. е. размером зерен продукта измельчения.

Теория измельчения основывается на двух гипотезах: поверхностной и объемной.

Поверхностная теория предложена Риттингером [1]. По Риттингеру, работа, затраченная при измельчении, пропорциональна вновь полученной площади поверхности измельченного материала.

Объемная теория была впервые предложена и доказана В. Л. Кирпичевым, который сформулировал закон подобия для тел, находящихся в упругом состоянии [2]. Позднее Ф. Кик опубликовал работу [3], в которой закон подобия В. Л. Кирпичева был распространен на область пластических деформаций хрупких материалов. По закону Кирпичева–Кика расход энергии на дробление материала пропорционален его объему или массе.

Теория Кирпичева–Кика учитывает затраты энергии на упругую, а затем пластическую деформацию тела и совершенно не учитывает расхода энергии на образование новых поверхностей (в отличие от закона Риттингера, который учитывает только эту энергию), на преодоление сил внешнего и внутреннего трений, потери энергии, связанные с тепловыми явлениями.

По закону Кирпичева энергия, необходимая для одинакового изменения формы геометрически подобных и однородных тел, меняется как объемы или вес этих тел. Этот закон иногда называют законом подобия и формулируют другими словами: энергия, которая тратится на измельчение геометрически подобных тел при одинаковом напряженном состоянии, пропорциональна объемам тел, которые разрушаются.

Для определения энергозатрат в теории измельчения горных пород используют следующие эмпирические законы [4].

Работа разрушения горной породы определяется при крупном дроблении по формуле Кирпичева

$$A_1 = k_1 D^3, \quad (1)$$

при среднем дроблении – по формуле Бонда

$$A_2 = k_2 D^{2,5}, \quad (2)$$

при мелком дроблении по формуле – Риттингера

$$A_3 = k_3 D^2. \quad (3)$$

В соотношениях (1) – (3) k_i, $i = 1,2,3$ – коэффициенты пропорциональности, D – диаметр измельчаемого куска породы.

Закон (1) применим в интервале крупности от 1000 до 200 мм, закон (2) – в интервале от 200 мм до 1 мм, а закон (3) – в интервале от 1 мм до 0,001 мм. Они охватывают субмикроскопический и макроскопический уровни разрушения.

Поскольку расход энергии на дробление обусловлен как деформацией, так и образованием новых поверхностей, П. А. Ребиндер предложил определить эту работу как сумму работ A_1 и A_3 [5].

Недостатком формул (1) – (3) является то, что в них присутствуют неизвестные коэффициенты пропорциональности k_i, вследствие чего невозможно определить абсолютное значение работы измельчения, и не разработана методика определения этих коэффициентов. Они поэтому пригодны лишь для определения относительной величины работы дробления материалов, т. е. при качественном исследовании процессов дробления.

В [6] дано обоснование единого энергетического закона дробления и измельчения твердых полезных ископаемых. Оно базируется на фундаментальном положении о том, что удельные энергозатраты на дробление и степень сокращения крупности материала предопределяются его физическими свойствами, отражающими способность оказывать сопротивление механическому разрушению.

Величина разрушающего напряжения на различных уровнях измельчения материала будет разной. По мере уменьшения крупности материала разрушающее напряжение возрастает, что обусловливает увеличение удельных энергозатрат.

На сегодняшний день существуют различные способы помола угля, но основными наиболее отработанными и изученными являются способы мокрого размола, основанные на использовании шаровых и стержневых мельниц.

Механизм разрушения твердых полезных ископаемых в различных дробильных и измельчающих машинах изучается для двух вариантов нарушения целостности образца.

В первом варианте разрушение материала рассматривается на атомном уровне, получившем название атомного механизма разрушения. Процесс разрушения в этом случае обусловлен разрывом связей между частицами кристалла и определяет теоретическую прочность твердого тела. Реальная же

прочность материала оказывается на несколько порядков меньше, что объясняется присутствием в нем точечных и линейных дефектов.

Второй вариант связан с изучением разрыва межзеренных связей материала, что имеет место в поликристаллических телах, каковыми являются горные породы. Силы взаимодействия между кристаллами значительно слабее по сравнению с силами взаимодействия элементарных частиц, из которых состоит отдельный кристалл.

Если принять напряжение, при котором происходит разрушение куска породы, за напряжение, соответствующее пределу прочности, то удельную работу дробления материала, как и в механике твердого тела, можно определить по формуле

$$A = \frac{\sigma^2}{2E}, \tag{4}$$

где σ – предел прочности материала на сжатие; E – модуль упругости.

В соответствии с положениями механики твердого тела, по мере уменьшения линейных размеров тела увеличивается предел его прочности на сжатие. Это изменение для тел, подверженных хрупкому разрушению, согласно А. Н. Стро и Н. И. Петчу, подчиняется закономерности [7]

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2}, \tag{5}$$

где σ_0 – предел прочности относительно больших образцов, у которых проявлением масштабного эффекта можно пренебречь; d – средний диаметр зерна. Постоянная k определяется следующей эмпирической формулой

$$k = [6\pi\gamma G/(1-\nu)]^{1/2}, \tag{6}$$

где γ – удельная поверхностная энергия разрушения; G – модуль сдвига; ν – коэффициент Пуассона.

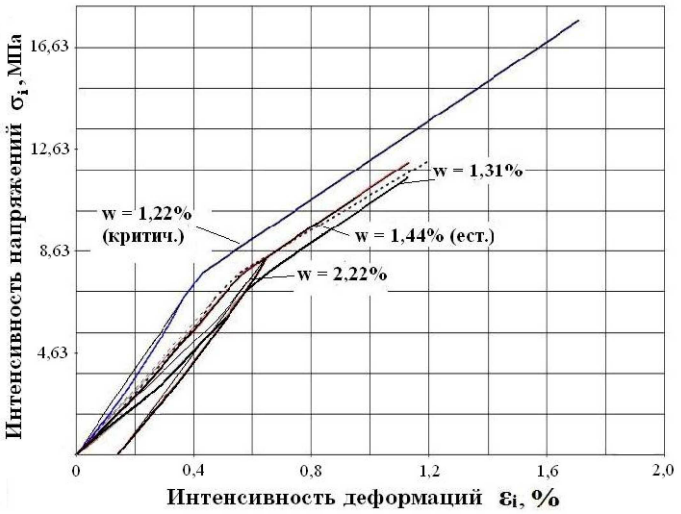
Удельная работа разрушения в каждом акте с учетом многостадийности процесса определится как суммарная работа дробления

$$A = \sum_{i=1}^{n} \frac{\sigma_i^2}{2E}, \tag{7}$$

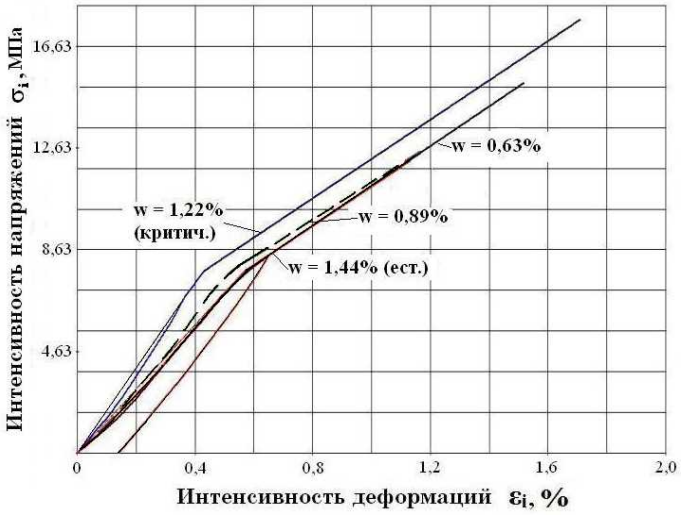
где i – степень измельчения кусков породы; σ_i – предел прочности на сжатие на i-м этапе дробления.

Анализ результатов. Для определения удельной работы разрушения каменного угля по формуле (7) на каждой стадии дробления необходимо знать предел прочности материала.

На рис. 1 (*а, б*) представлены диаграммы деформирования угля марки СС при различной влажности *w* (естественная влажность *w* = 1,44 %): а) при *w* = 2,22 %, 1,44 %, 1,31 %, 1,22 %; б) при *w* = 1,44 %, 1,22 %, 0,89 %, 0,63 % [8].



а)



б)

Рис. 1

При расчете энергии разрушения для каменного угля принимаем следующие значения физико-механических характеристик: σ_0 = 15 – 25 МПа; E = 6200 МПа; γ = 30 – 100 Дж/м^2; ν = 0,24.

На рис. 2 представлены зависимости предела прочности σ и удельной работы разрушения A в зависимости от степени измельчения n (кривые 1, 2 соответственно), а на рис. 3 – зависимость удельной работы разрушения от предела прочности при различных значениях удельной поверхностной энергии разрушения (кривая 1 соответствует значению $\gamma = 30$, 2 – $\gamma = 50$, 3 – $\gamma = 100$).

Как видно из графиков, с увеличением степени дробления происходит увеличение предела прочности и удельной работы разрушения на сжатие каменного угля, вместе с тем получено, что величина удельной поверхностной энергии разрушения не оказывает существенного влияния на работу разрушения для линейных размеров частиц меньше 0,4 мм.

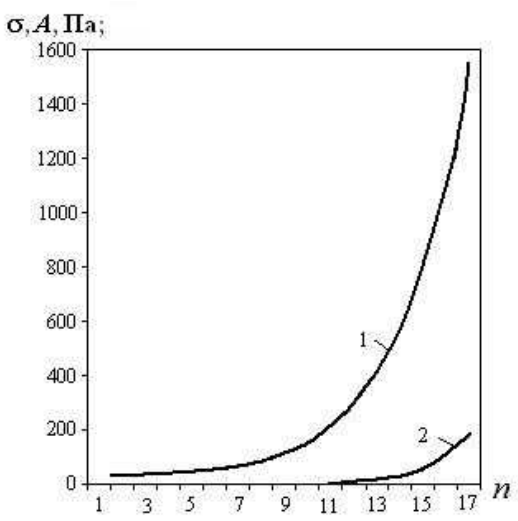


Рис. 2

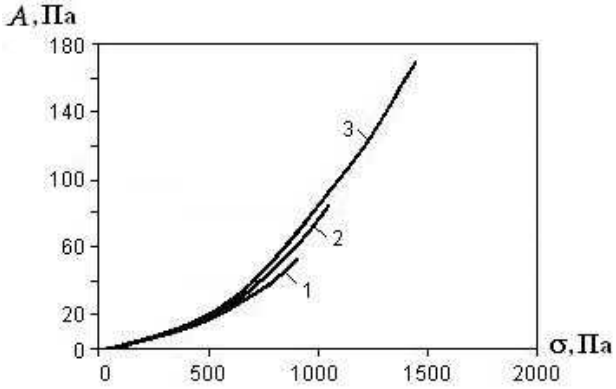


Рис. 3

Выводы. Полученые зависимости для удельной работы разрушения дают возможность более точно планировать и организовывать работу оборудования по измельчению каменного угля до дисперсного состояния, пригодного для приготовления тонкодисперсного водоугольного топлива.

1. *Rittinger P. R.* Lehrbuch der aufbereitungskunde / *P. R. Rittinger*. – Berlin, 1867.
2. *Кирпичёв В. Л.* О подобии при упругих явлениях / *В. Л. Кирпичёв* // Журнал Русского физико-химического общества. – 1874. – Т. 6, вып. 9. – С. 90 – 120.
3. *Kick F.* Das gesertz, der proportionalen widerstande und seine anwendungen / *F. Kick*. – Leipzig, 1885.
4. *Черепанов Г. Л.* Механика разрушения горных пород в процессе бурения / *Черепанов Г. Л.* – М. : Недра, 1987. – 308 с.
5. *Ребиндер П. А.* О влиянии изменений поверхностной энергии на спайность, твердость и другие свойства кристаллов / *П. А. Ребиндер* // Съезд русских физиков : сб. докладов. – М.-Л. : ГИЗ, 1928. – С. 29.
6. *Родин Р. А.* О гипотезах дробления / *Р. А. Родин* // Изв. вузов. Горный журнал. – 1989. – № 4. – С. 71 – 79.
7. *Ракишев Б. Р.* Энергоемкость механического разрушения горных пород / *Ракишев Б. Р.* – Алматы : Баспагер, 1998. – 210 с.
8. *Сазонов М. С.* Исследование физико-механических характеристик каменных углей при различных влажностях воздуха / *М. С. Сазонов* // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2011. – № 1. – С. 41 – 48.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
Днепропетровск

Получено 20.10.2015,
в окончательном варианте 28.10.2015