МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Романенко В. С., аспирант,
Богданов В. С., д-р техн. наук, проф.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВАЛКОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ С УЧЕТОМ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА

v.s_bogdanov@mail.ru

В статье представлен расчет усилия измельчения в горизонтальной валковой мельнице. Получена математическая зависимость величины усилия измельчения от свойств измельчаемого материала, от начального размера частиц измельчаемого материала, от линейной степени однократного разрушения и от величины деформации измельчаемого слоя материала.

Ключевые слова: *сила, линейная степень однократного разрушения, работа, объемная степень измельчения, деформация измельчаемого слоя.*

В строительной промышленности измельчению подвергают материалы, имеющие различные твердость, абразивность и крепость [1]. При их измельчении, т.е. в процессе разделения твердого куска материала на отдельные части, внешние механические силы преодолевают внутренние силы сцепления между отдельными частицами вещества и при этом образуются новые поверхности. Процессы измельчения материалов основываются на известных из теории упругости деформациях – сжатии, растяжении, изгибе и сдвиге – с переходом напряжений за предел прочности материалов.

Одной из важнейших характеристик определяющих эффективность работы горизонтальной валковой мельницы, является усилие измельчения материала, т.е. усилие с которым валки воздействуют на измельчаемый материал. Усилие дробления зависит от свойств измельчаемого материала.

Формулу определения усилия измельчения, необходимого для разрушения материала, можно вывести из равенства работ найденных двумя способами.

Первый способ вытекает из теории Риттингера. Он предположил, что работа, затрачиваемая на измельчение, пропорциональна размеру вновь образованной поверхности в измельчаемом материале. Его решение сводится к следующему [2]:

Тело кубической формы с ребром D разрушается любым способом до кубов с ребром d. Число полученных кубиков, очевидно, пропорционально кубу степени измельчения, т. е. $z = \frac{D^3}{d^3}$.

Поверхность куба с ребром D:

$$S_{\acute{i}} = 6D^2. \tag{1}$$

Общая поверхность полученных кубов с ребром d:

$$S_{\hat{e}} = 6d^2\left(\frac{D^3}{d^3}\right). \tag{2}$$

Вновь образованная поверхность:

$$S = S_{\hat{e}} - S_{\acute{i}} = 6D^2\left(i-1\right). \tag{3}$$

Далее принимается, что на образование единицы новой поверхности при измельчении данного материала затрачивается постоянная работа $A_у$, которая определяется опытным путем и может быть названа удельной работой. Тогда вся работа, затрачиваемая на измельчение рассматриваемого тела, очевидно, будет равна:

$$A = A_y S = 6A_y D^2 (i-1). \tag{4}$$

Теория Риттингера имеет ряд недостатков. Предположение о прямой пропорциональности работы измельчения вновь образованной поверхности можно считать справедливым только в случае измельчения тела резанием или распиливанием, когда объем обрабатываемого материала практически не влияет на затрату энергии. Если измельчение производится раздавливанием, раскалыванием, ударом или комбинированным способом, это предположение несправедливо, так как в этих случаях не учитывается энергия, затрачиваемая на деформацию тела без разрушения. В теории Риттингера также не учитывается путь действия силы, вызывающей разрушение тела - это ее главный недостаток.

С современной точки зрения на основе известных законов технической механики можно более точно оценить установившуюся величину удельного расхода энергии в области тонкого измельчения.

При переходе из области крупного измельчения в область тонкого частицы однородных материалов сохраняют свой технологический состав и основные физико-механические свойства. Вывод о том, что с уменьшением размера частиц растет их прочность, к этим материалам неприменим. При измельчении неоднородных материалов, т.е. материалов, состоящих из склеенных или спаянных частиц разных веществ, с уменьшением размера частиц их физико-механические свойства изменяются. Это изменение может идти как в сторону повышения, так и в сторону понижения прочностных свойств материала частиц, что еще не означает увеличения удельного расхода энергии при переходе в область тонкого измельчения.

Большинство горных пород при сжатии не дают остаточных деформаций. Кривая сжатия таких пород плавно поднимается вверх и, когда в материале напряжение достигнет разрушающего, круто обрывается и падает вниз. Такие тела практически абсолютно упругие, и для них можно применить известное выражение работы деформации:

$$A = \frac{\sigma^2 V}{2E}. \qquad (5)$$

Если в это выражение вместо текущего напряжения подставить разрушающее или предел прочности $\sigma_р$, то оно позволит определить работу однократного разрушения тела объемом v:

$$A_0 = \frac{\sigma_p^2 \upsilon}{2E}. \qquad (6)$$

Допустим, что данное тело имеет постоянную объемную степень однократного разрушения a_0, т.е. при однократном разрушении оно делится на a_0 частиц. Пусть начальный размер тела D, а размер конечных частиц d. Размер промежуточных частиц обозначим d_1, d_2 и т. д.

Перед первым приемом разрушения тело имело объем D^3 и поверхность $6D^2$. После первого разрушения получено a_0 частиц размером d_1 и объемом d_1^3 каждая. Поверхность каждой частицы $6d_1^2$ а общая поверхность всех частиц $a_0 6\ d_1^2$.

При этом затрачивается работа:

$$A_1 = \frac{\sigma_p^2 D^3}{2E}. \qquad (7)$$

После второго приема разрушения из каждой частицы размером d_1 получается снова a_0 частиц, но уже размером d_2. Общее число полученных частиц $a_0 a_0 = a_0^2$ объем каждой частицы d_2^3 и ее поверхность $6d_2^2$. Общая поверхность всех частиц $a_0 6 d_2^2$. При этом затрачивается работа:

$$A_2 = \frac{\sigma_p^2 a_0 d_1^3}{2E} = \frac{\sigma_p^2 D^3}{2E}, \qquad (8)$$

где $a_0 d_1^3 = D^3$.

После третьего приема разрушения из каждой частицы размером d^2 получается опять a_0 частиц, но теперь размером d_3. Общее число полученных частиц $a_0 a_0 a_0 = a_0^3$. Объем каждой частицы d_3^3 и поверхность $6d_3^2$. Общая поверхность всех частиц $a_0 6 d_3^2$, а затраченная при этом работа:

$$A_3 = \frac{\sigma_p^2 a_0^2 d_2^3}{2E} = \frac{\sigma_p^2 D^3}{2E}. \qquad (9)$$

Из полученных результатов можно заключить, что при n-м приеме разрушения из каждой частицы размером d_{n-1} получается a_0 новых частиц, но размером d. Общее число полученных частиц $a_0 a_0 \ldots a_0 = a_0^n$, объем одной частицы d^3 и поверхность $6d^2$. Общая поверхность всех частиц $a_0^n 6d^2$ и затраченная при этом работа:

$$A_n = \frac{\sigma_p^2 a_0^{n-1} d_{n-1}^3}{2E} = \frac{\sigma_p^2 D^3}{2E}. \qquad (10)$$

Для упрощения дальнейших выводов примем во внимание, что

$$d_1 = \frac{D}{\sqrt[3]{a_0}}; d_2 = \frac{d_1}{\sqrt[3]{a_0}} = \frac{D}{\sqrt[3]{a_0^2}}; d_3 = \frac{d_2}{\sqrt[3]{a_0}} = \frac{D}{\sqrt[3]{a_0^3}};$$

$$d_{n-1} = \frac{d_{n-2}}{\sqrt[3]{a_0}} = \frac{D}{\sqrt[3]{a_0^{n-1}}};\ d = \frac{d_{n-1}}{\sqrt[3]{a_0}} = \frac{D}{\sqrt[3]{a_0^n}}, \qquad (11)$$

и $\sqrt[3]{a_0} = i$ — линейная степень однократного разрушения.

Можно обобщить полученные данные, показывающие расход энергии на единицу вновь образованной поверхности в зависимости от приема разрушения.

При первом приеме разрушения вновь образованная поверхность:

$$S_1 = 6\left(a_0 d_1^2 - D^2\right) = 6D^2\left(i_0 - 1\right). \qquad (12)$$

Удельная работа:

$$A_{y1} = \frac{\sigma_p^2 D^3}{2E6D^2(i_0 - 1)}. \qquad (13)$$

При втором приеме разрушения вновь образованная поверхность:

$$S_2 = 6a_0\left(a_0 d_2^2 - d_1^2\right) = 6D^2 i_0\left(i_0 - 1\right). \quad (14)$$

Удельная работа:

$$A_{y2} = \frac{\sigma_p^2 D^3}{2E6D^2 i_0 (i_0 - 1)}. \quad (15)$$

При третьем приеме разрушения вновь образованная поверхность:

$$S_3 = 6a_0^2\left(a_0 d_3^2 - d_2^2\right) = 6D^2 i_0^2\left(i_0 - 1\right). \quad (16)$$

Удельная работа:

$$A_{y3} = \frac{\sigma_p^2 D^3}{2E6D^2 i_0^2 (i_0 - 1)}. \quad (17)$$

При n-ом приеме разрушения вновь образованная поверхность:

$$S_n = 6a_0^{n-1}\left(a_0 d^2 - d_{n-1}^2\right) = 6D^2 i_0^{n-1}\left(i_0 - 1\right). \quad (18)$$

Удельная работа:

$$A_{yn} = \frac{\sigma_p^2 D^3}{2E6D^2 i_0^{n-1} (i_0 - 1)}. \quad (19)$$

Видно, что во всех выражениях для удельной работы числитель дроби остается постоянным, а знаменатель непрерывно растет, так как увеличивается показатель степени величины i_0, которая всегда больше единицы. Таким образом, при переходе к последующему приему разрушения удельный расход энергии снижается, а не остается постоянным, как это допускается в теории Риттингера.

Этот вывод показывает, что вновь образованная поверхность, являясь весьма важной характеристикой зернистого материала, не может служить мерой расхода энергии на измельчение. Иначе говоря, между вновь образованной поверхностью и затраченной на ее образование энергией нет прямой зависимости, которая предполагается в теории Риттингера. Это и является ее основным недостатком. Путь действия разрушающей силы учтен в удельной работе A_y, определяемой опытным путем.

Величина *n*, т. е. число приемов разрушения, необходимых для получения из тела размером *D* частиц размером *d*, при степени однократного разрушения a_0 определяется следующим образом: после *n*-кратного разрушения тела получается a_0^n частиц размером *d*. Для получения таких частиц объемная степень измельчения должна быть:

$$\frac{D^3}{d^3} = i^3 = a_0^n,$$

откуда

$$3\lg i = n \lg a_0$$

или

$$n = \frac{3\lg i}{\lg a_0}. \quad (20)$$

Поскольку, как было установлено выше, при каждом приеме разрушения теоретически затрачивается одна и та же работа, а для разрушения тела размером *D* до частиц размером *d* требуется *n* приемов, то, очевидно, общая работа на эту операцию равна:

$$A = \left(\frac{\sigma_p^2 D^3}{2E}\right)\left(\frac{3\lg i}{\lg a_0}\right). \quad (21)$$

Формула (21) предполагает, что измельчаемое тело однородное, абсолютно упругое и делится на части по строго определенному геометрическому закону, она показывает что, расход энергии с уменьшением a_0, т.е. степени однократного разрушения, растет. Однако, так как тело при разрушении делится минимум на две части, в этом крайнем случае расход энергии на единицу измельченного материала будет максимальным.

Таким образом, при $a = 2$:

$$A_{\max} = 5\left(\frac{\sigma_p^2 D^3}{E}\right)\lg i. \quad (22)$$

Расход энергии при тонком измельчении теоретически должен быть в 3-4 раза больше, чем при крупном, мелком и среднем, а фактически он больше в 15-20 раз. Такое расхождение объясняется не только «упрочнением» частиц по мере уменьшения их размера, но главным образом тормозящим действием переизмельченного материала. В машинах крупного, среднего и мелкого дробления процесс измельчения завершается в 1-3 приема, а в машинах тонкого измельчения в 100-120 приемов разрушения. Перед машинами крупного, среднего и мелкого измельчения почти всегда устанавливают грохот для отделения из сырья кусков, не требующих дробления. В машинах же тонкого измельчения уже готовый продукт остается продолжительное время в зоне измельчения, тормозя процесс.

При измельчении в горизонтальной валковой мельнице, когда $i = 12$ за один цикл, расход энергии будет равен:

$$A_{i=12} = 5{,}396\frac{\sigma_p^2 D^3}{E}. \quad (23)$$

Второй способ вытекает из теории Кирпичева-Кикка, они дали несколько отличное решение рассматриваемой теории измельчения. Указанные авторы предполагали, что энергия, требуемая для производства аналогичных изменений в очертании геометрически подобных тел одинакового технологического состава, изменяется пропорционально объемам или массам этих тел.

Теория Кирпичева-Кикка в ее первоначальном виде была также недостаточной для решения практических задач. Это побудило Стедлера, одного из активных сторонников теории Кирпичева-Кикка, предпринять попытку развить эту теорию, придав ей математическую форму, приемлемую для инженерных решений. Его выводы сводятся к следующему:

Если под действием внешних сил в теле возникают напряжения, превышающие предел прочности, оно разрушается, но при этом полученные куски могут оказаться крупнее тех, которые требуются. Тогда их подвергнут повторному разрушению, пока не будут получены частицы размером d.

В дальнейших рассуждениях принимается, что объемная степень измельчения при однократном разрушении данного материала r остается постоянной независимо от размера кусков. Тогда средний объем полученных кусков будет равен:

при первом разрушении куба

$$d_1^3 = V_1 = \frac{D^3}{r}; \qquad (24)$$

при втором разрушении куба

$$d_2^3 = V_2 = \frac{D^3}{r^2}; \qquad (25)$$

при *n*-ом разрушении

$$d^3 = V_n = \frac{D^3}{r^n}; \qquad (26)$$

или

$$r^n = \frac{D^3}{d^3} = i^3 = a, \qquad (27)$$

где a – объемная степень измельчения.

Отсюда число приемов разрушения, необходимое для получения из куба размером D кубиков размером d, равно:

$$n = \frac{\lg a}{\lg r} = \frac{3(\lg D - \lg d)}{\lg r}. \qquad (28)$$

Работа измельчения тела по Стедлеру равна произведению степени измельчения на разрушающую силу и на путь действия этой силы:

$$A = aFl = i^3 Fl, \qquad (29)$$

где F – разрушающая сила; – путь действия разрушающей силы, или величина деформации тела, при которой оно разрушается.

Применительно к горизонтальной валковой мельнице работа измельчения по Стедлеру будет иметь вид:

$$A = i^3 F\Delta s, \qquad (30)$$

где F – разрушающая сила; Δs – величина деформации тела, при которой оно разрушается, то есть в горизонтальной валковой мельнице - это изменение толщины слоя измельчаемого материала.

Приравняв работы, найденные двумя способами, можно вывести формулу определения разрушающей силы в зависимости от прочности материала:

$$5\left(\frac{\sigma_p^2 D^3}{E}\right)\lg i = i^3 F\Delta s; \qquad (31)$$

$$F = \frac{5\sigma_p^2 D^3 \lg i}{i^3 E\Delta s}. \qquad (32)$$

В горизонтальной валковой мельнице, когда i = 12 за один цикл, формула разрушающей силы примет вид:

$$F = 0,003\frac{\sigma_p^2 D^3}{E\Delta s}. \qquad (33)$$

Найденная формула необходима для определения усилия в пружинах защитного устройства. Усилие в пружинах должно удовлетворять следующему неравенству:

$$F_{пр} \geq F. \qquad (34)$$

Усилие в пружинах должно быть больше или равно усилию разрушения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Дешко*, Ю.И. и др. Измельчение материалов в цементной промышленности /Ю.И. Дешко, Г.С. Крыхтин, М.Б. Креймер//. – М.: Стройиздат. – 1966. – 232 с.

2. *Сиденко*, П.М. Измельчение в химической промышленности. Изд. 2-е перераб. /П.М.Сиденко – М.: «Химия», 1977. – 368 с.