

ВПЛИВ СПОСОБУ ПОДРІБНЕННЯ НА ЕНЕРГОВИТРАТИ ПРОЦЕСУ

В багатьох галузях промисловості особливе місце займають процеси подрібнення матеріалів, як найбільш важливі та енергоємні. В теорії розрахунку витрат енергії на подрібнення найбільш відомі методи, запропоновані Рітінгером, Кірпічовим-Кіком, Бондом і Рундквістом [1, 2, 3]. Але жоден з них не знайшов практичного застосування через те, що вони враховують лише геометричні розміри часток, які подрібнюються, та характеристики матеріалу, не зважаючи на спосіб та умови подрібнення. Все це ускладнює використання звичайних методів для опису реальних процесів подрібнення.

Твердий матеріал можна зруйнувати та подрібнити до часток бажаного розміру розчавлюванням, розколюванням, розламуванням, різанням, зтиранням, ударом та різними поєднаннями цих способів. В більшості видів промислових подрібнювачів втілено поєднання подрібнення ударом та тертям, зокрема в подрібнювачах з вільними тілами, що подрібнюють.

Нами пропонується метод розрахунку енерговитрат процесу подрібнення в залежності від співвідношення впливу способів ударного руйнування та руйнування тертям, а також зміни міцнісної характеристики матеріалу в процесі подрібнення.

Для руйнування часток матеріалу витрачається певна кількість енергії, що залежить від міцності матеріалу, що подрібнюється. Максимальною (теоретичною) міцністю характеризується гіпотетичне тверде тіло з бездефектною кристалічною будовою, в якому відсутні фізичні макродефекти. Реальна міцність матеріалів завжди менше теоретичної через наявність таких дефектів. Теоретична міцність однорідного матеріалу характеризується напругою, необхідною для поділу двох прилеглих один до іншого шарів атомів. Рівняння, яке запропоновано Орованом-Келлі [5], дозволяє розрахувати теоретичну міцність матеріалу, з умови, що в момент руйнування вся енергія пружної деформації, яка накопичена в обсязі між двома шарами, переходить в поверхневу енергію двох новоутворених при руйнуванні поверхонь.

Згідно зі статистичною теорією міцності [1], дефекти в будові твердого тіла розподілені стохастично за об'ємом; тобто зменшення розмірів часток приводить до зменшення числа дефектів. Залежність міцності твердих тіл від лінійних розмірів є масштабним ефектом або масштабним фактором.

В подрібнювачах (кульові, вібраційні млини) з вільними тілами матеріал руйнується за рахунок розколювання часток внаслідок ударного впливу та стирання. Інтенсивне перекочування часток матеріалу та кульового завантаження призводить до того, що форми часток будуть наближатися до випуклих, так як всі загострення будуть концентраторами напружень, які руйнуються в першу чергу.

Подрібнення матеріалу проходить поетапно. Ударний вплив призводить до розколювання частинки матеріалу щонайменше на дві частини. Кожен з обламків обтирається за рахунок сил тертя і приймає випуклу форму. Частина матеріалу, що утворюється за рахунок стирання, вважається дуже дисперсною і тому не приймає участі у подальшому процесі подрібнення. Кожна з частинок отриманих після розколювання початкової частки та обтирання, знову розколюється щонайменше на дві частинки, кожна з котрих обтирається до випуклої форми. Таким чином процес триває доки частки матеріалу не зменшаться до потрібного розміру (рис. 1).

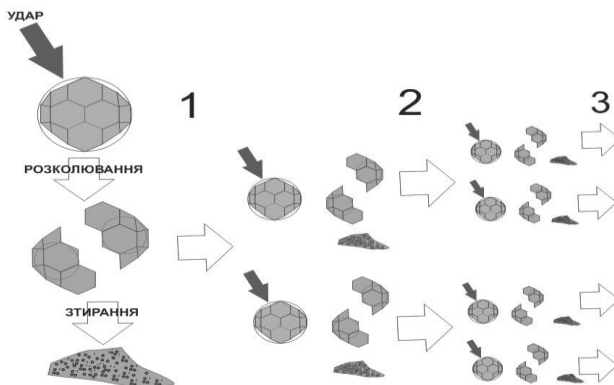


Рисунок 1 – Стадії руйнування частки матеріалу під впливом ударного навантаження та сил тертя

Корисна робота, що витрачається на подрібнення, розділяється на дві складові: роботу удару (A_p) та роботу тертя (A_{mp}):

$$A = A_p + A_{mp}. \quad (1)$$

Руйнування ударом (розколювання) виникає, коли енергія пружної деформації, що накопичена тілом, переходить в поверхневу енергію утворення нової поверхні:

$$A_p = \frac{\sigma^2 V}{2E} = \frac{\sigma^2 k d^3}{2E}, \quad (2)$$

де σ – границя міцності на стискання частки матеріалу, Па/м²; V – об’єм частки матеріалу, м³; d – розмір частки матеріалу (діаметр сфери описаної навколо багатогранника, до форми якого прямує форма частки матеріалу), м; k – коефіцієнт форми; E – модуль пружності матеріалу (модуль Юнга), Па/м².

На подрібнення тертям в кульовому млині (за Таггартом [5]) витрачається близько 1,5–2 % енергії, що відповідає долі маси (об’єму) матеріалу, який стирається.

Пропонується ввести параметр p , який характеризує долю енергії, що приходить на подрібнення ударом. Тоді енергії тертя відповідає доля в $(1-p)$.

Міцність матеріалу починає значно збільшуватись з досягненням частки певного критичного розміру – $d_{кр}$, який визначається окремо для кожного матеріалу [5]. Тобто процес подрібнення внаслідок розколювання під впливом ударного навантаження можна поділити на дві частини: подрібнення до критичного розміру часток і подрібнення часток до розміру, меншого за критичний. В першій частині процесу подрібнення проявом масштабного ефекту можна знехтувати через незначне його проявлення та прийняти значення границі міцності матеріалу на стискання постійним. Воно повинно дорівнювати практичному значенню границі міцності для даного конкретного матеріалу – σ_{np} . Припустимо, що перша частина процесу подрібнення – від початкового розміру d до критичного розміру $d_{кр}$, реалізується за n_1 етапів. Тоді енергія, яка необхідна для руйнування ударом однієї частки матеріалу в першій частині процесу подрібнення дорівнює

$$A_{p1} = \frac{\sigma_{np}^2 k d^3}{2E} \sum_{i=0}^{n_1} p^i. \quad (3)$$

В другій частині процесу подрібнення границя міцності починає зростати, тобто її значення буде залежати від розміру частинки (ступеню подрібнення, або етапу подрібнення). Пропонується представляти прояв масштабного ефекту починаючи від розміру частки $d_{кр}$ у вигляді експоненційної залежності границі міцності від етапу подрібнення. Таким чином границя міцності буде асимптотично прямувати від практичного значення до теоретичного:

$$\sigma_i = \sigma_{np} + \sigma_m (1 - e^{-\alpha i}), \quad (4)$$

де σ_i – границя міцності на стискання на i -му етапі подрібнення, Па/м²; σ_{np} – практичне значення границі міцності на стискання для даного матеріалу для часток більших за розміром, ніж $d_{кр}$, Па/м²; σ_m – теоретичне значення границі міцності матеріалу на стискання, що визначається за рівнянням Орована-Келлі, Па/м²; α – коефіцієнт масштабного ефекту, який визначається емпірично для кожного конкретного матеріалу при заданому значенні p для даного процесу подрібнення; i – етап подрібнення.

Для другої частини процесу значення енергії, що витрачається на подрібнення однієї частки матеріалу від початкового розміру $d_{кр}$ до заданого можна визначити наступним рівнянням:

$$A_{p2} = \frac{k d_{кр}^3}{2E} \sum_{i=0}^{n_2} \left[p^i \left(\sigma_{np} + \sigma_m (1 - e^{-\alpha i}) \right)^2 \right], \quad (5)$$

де n_2 – кількість етапів подрібнення другої частини процесу.

Руйнування тертям – обтирання виникає за рахунок накопичення руйнівних напруг в нескінченно тонких поверхневих шарах часток матеріалу в результаті чого видаляється матеріал у вигляді надтонкої фракції. Кожен етап руйнування, коли обтиранням видаляється доля матеріалу $(1-p)$, містить в собі безліч

послідовностей обтирання надтонких шарів матеріалу, сумарний об'єм яких складає $kd^3(1-p^n)$. Оскільки процес обтирання протікає поетапно з накопиченням руйнівної напруги в надтонкому шарі матеріалу, то границя міцності для цього процесу прямує до теоретичного значення за рахунок малих об'ємів накопичення та руйнування. Це зумовлено мінімально можливою кількістю дефектів структури для нескінченно малого об'єму матеріалу.

Робота сил тертя, яка витрачається на обтирання $(1-p)$ долі матеріалу частки початковим розміром d дорівнює:

$$A_{mp1} = \frac{\sigma_m^2 kd^3}{2E} (1 - p^{n_1}) \quad (6)$$

для першої частини процесу подрібнення;

$$A_{mp2} = \frac{\sigma_m^2 kd_{kp}^3}{2E} (1 - p^{n_2}) \quad (7)$$

для другої частини.

Виразу, що визначає роботу, яка витрачається на подрібнення частки матеріалу від початкового розміру d до розміру початку прояву масштабного ефекту d_{kp} за n_1 етапів, визначається сумою рівнянь (3) та (6):

$$A_1 = \frac{kd^3}{2E} \left(\sigma_{np}^2 \sum_{i=0}^{n_1} p^i + \sigma_m^2 (1 - p^{n_1}) \right). \quad (8)$$

Після додавання рівнянь (5) та (7) отримаємо вираз для визначення роботи, яка витрачається на подрібнення частки матеріалу від розміру початку прояву масштабного ефекту d_{kp} до кінцевого розміру d_k в n_2 етапів:

$$A_2 = \frac{kd_{kp}^3}{2E} \left(\sum_{i=0}^{n_2} \left[p^i \left(\sigma_{np} + \sigma_m (1 - e^{-ai}) \right)^2 \right] + \sigma_m^2 (1 - p^{n_2}) \right). \quad (9)$$

У випадку розглядання подрібнення частки від початкового розміру d , більшого за d_{kp} до кінцевого розміру d_k , меншого за d_{kp} , робота, яка витрачається на подрібнення виражається у вигляді суми рівнянь (8) та (9). Необхідно враховувати той факт, що на початку другої частини в процесі подрібнення приймає участь a^{n_1} часток розміром d_{kp} , які було утворено в результаті подрібнення початкової частинки за n_1 етапів. Приймаємо мінімальне значення кількості часток, що утворюються в результаті розколювання під впливом ударного навантаження $a = 2$. Звідси:

$$A = \frac{kd^3}{2E} \left(\sigma_{np}^2 \sum_{i=0}^{n_1} p^i + \sigma_m^2 (1 - p^{n_1}) \right) + 2^{n_1} \frac{kd_{kp}^3}{2E} \left(\sum_{i=0}^{n_2} \left[p^i \left(\sigma_{np} + \sigma_m (1 - e^{-ai}) \right)^2 \right] + \sigma_m^2 (1 - p^{n_2}) \right). \quad (10)$$

Вираз (10) показує залежність роботи, витраченої на подрібнення однієї частинки, від етапу подрібнення. Для того, щоб сформулювати аналогічну залежність для подрібнення матеріалу масою m_m , треба вираз (10) помножити на кількість частинок N , що міститься в матеріалі масою m_m :

$$N = \frac{m_m}{m_q} = \frac{m_m}{kd^3 \rho}, \quad (11)$$

де m_m – маса матеріалу, що підлягає подрібненню, кг; m_q – маса однієї початкової частки матеріалу, що підлягає подрібненню, кг; ρ – густина матеріалу, кг/м³. Це дає змогу знайти значення енергії, яка витрачається на подрібнення:

$$A = \frac{m_M}{2E\rho} \left(\left(\sigma_{np}^2 \sum_{i=0}^{n_1} p^i + \sigma_m^2 (1 - p^{n_1}) \right) + \right. \\ \left. + 2^{n_1} \frac{d_{kp}^3}{d^3} \left(\sum_{i=0}^{n_2} \left[p^i \left(\sigma_{np} + \sigma_T (1 - e^{-ai}) \right)^2 \right] + \sigma_m^2 (1 - p^{n_2}) \right) \right) \right). \quad (12)$$

Для того, щоб виразити значення енергії, яка витрачається на подрібнення від геометричних розмірів часток матеріалу, що подрібнюється, визначимо значення кількості етапів подрібнення у кожній частині цього процесу: Максимальна ступень подрібнення матеріалу – u дорівнює:

$$u = \frac{d}{d_\kappa}. \quad (13)$$

З кожним етапом кожна частка розколюється на a шматків. Звідси можна стверджувати, що

$$a^n = \frac{d^3}{d_\kappa^3} = u^3. \quad (14)$$

Прийнявши мінімальне значення $a = 2$, визначимо кількість етапів, необхідних для отримання певного розміру частки матеріалу, що подрібнюється:

$$n = \frac{3 \lg u}{\lg 2} \approx 10 \lg \frac{d}{d_\kappa}. \quad (15)$$

З цього рівняння можна виразити кількості етапів першої

$$n_1 = 10 \lg \frac{d}{d_{kp}} \quad (16)$$

та другої

$$n_2 = 10 \lg \frac{d_{kp}}{d_\kappa} \quad (17)$$

частин процесу помелу.

Залежність роботи, що витрачається на подрібнення маси матеріалу m_m комбінованим способом удару та зтирання від початкового та кінцевого розміру часток, характеристик матеріалу (початкова практична границя міцності, розмір частки початку прояву масштабного ефекту, коефіцієнт масштабного ефекту, теоретична границя міцності даного матеріалу, параметр характеру процесу помелу) визначається шляхом підстановки виразів (16) та (17) до рівняння (12):

$$A = \frac{m_M}{2E\rho} \left(\left(\sigma_{np}^2 \sum_{i=0}^{10 \lg \frac{d}{d_{kp}}} p^i + \sigma_T^2 \left(1 - p^{10 \lg \frac{d}{d_{kp}}} \right) \right) + \right. \\ \left. + 2^{10 \lg \frac{d}{d_{kp}}} \frac{d_{kp}^3}{d^3} \left(\sum_{i=0}^{10 \lg \frac{d_{kp}}{d_\kappa}} \left[p^i \left(\sigma_{np} + \sigma_m (1 - e^{-ai}) \right)^2 \right] + \sigma_m^2 \left(1 - p^{10 \lg \frac{d_{kp}}{d_\kappa}} \right) \right) \right) \right). \quad (18)$$

Графічне зображення виразу (18) представлено рисунком 2. Сімейство кривих на рис. 2 відображають зміну значень енергії, яка витрачається на подрібнення, від величин долей впливу ударного руйнування (параметру p) в процесах помелу з різними значеннями ступеню подрібнення.

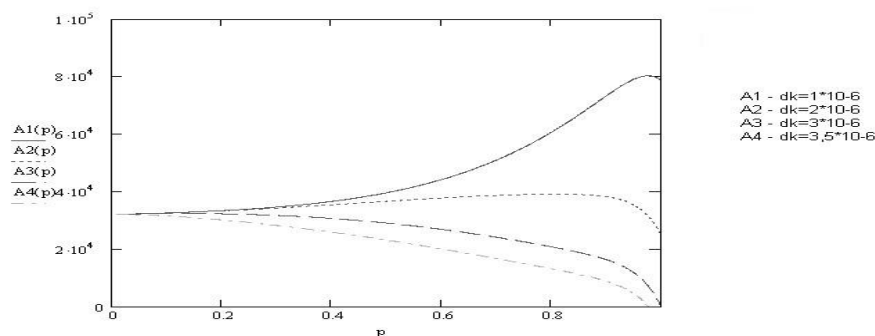


Рисунок 2 – Залежність роботи, яка витрачається на подрібнення, від долі впливу ударного руйнування для різних розмірів часток кінцевого продукту

Висновки. Вперше встановлено залежність енерговитрат процесу подрібнення від характеристик матеріалу та способу подрібнення – рівняння (18). Запропоновано використання параметру p , за допомогою якого можна задавати співвідношення впливу різних способів подрібнення на процес помелу. Це дало можливість порівняти значення енергії, що витрачається на подрібнення, в залежності від долі впливу ударного руйнування та руйнування тертям для процесів з різним рівнем дисперсності вихідного продукту. Це дає можливість застосувати раціональний спосіб подрібнення. Отримане рівняння свідчить про те, що в процесі помелу, коли розмір часток кінцевого продукту більший за критичний розмір частки, більш раціонально подрібнення ударом. При більш тонкому подрібненні збільшення долі енергії, яка приходить на руйнування тертям, призводить до значного зменшення енерговитрат процесу подрібнення.

Література

1. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности / Сиденко П.М. – М. : Химия, 1977. – 305 с.
2. Бонд Ф.С. Законы дробления / Бонд Ф.С. – М. : Стройиздат, 1966. – С. 195–208.
3. Рундквист А.К. Общая форма законов дробления / Рундквист А.К. – Научно-технический бюллетень Механобра, 1956. – №2
4. Таггарт А.Ф. Справочник по обогащению полезных ископаемых / Таггарт А.Ф. – Metallurgizdat, 1950. – Т. 2. – 270 с.
5. Андреев С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / Андреев С.Е., Перов В.А., Зверев В.В. – М. : Недра, 1981. – 415 с.

УДК 666.9

Кузнецова М.М., Ведь В.Е.

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА ЭНЕРГОЗАТРАТЫ ПРОЦЕССА

Предлагается метод определения энергии, затрачиваемой на помол материала, в зависимости от соотношения степени влияния ударного разрушения и разрушения трением, а также изменения прочностной характеристики материала в процессе измельчения.

Kuznetsova M.M., Ved V.E.

THE INFLUENCE OF A GRINDING MODE ON THE POWER INPUTS OF THE PROCESS

A method of energy definition was suggested, that is spend for grinding of a material, depending on the correlation of the scope of the impact fracture and friction distraction, and also change of the strengthening characteristic of the material in the process of grinding.