

АНАЛІЗ І ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДРОБАРОК З КЕРОВАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

АННОТАЦІЯ. Розглянуто питомі витрати енергії на одиницю отриманої продукції в подрібнювальних машинах. З метою зменшення енерговитрат пропонується розробка узагальненої теорії подрібнення і її подальше дослідження.

Ключові слова: дробарка, енерговитрати, напруження на площадці.

АННОТАЦИЯ. Рассмотрены удельные затраты энергии на единицу получаемой продукции в дробильных машинах. С целью уменьшения энергетических затрат предлагается разработка обобщенной теории измельчения и ее дальнейшее исследование.

Ключевые слова: дробилка, энергетические затраты, напряжение на площадке.

The SUMMARY. Work is devoted to survey of specific expenses of energy on unit of received production in crushing machines. With the purpose of reduction of power expenses development of the generalized theory of crushing and its further research is offered.

Key words: the Crusher, power expenses, a pressure on a platform.

Постановка проблеми

Питомі витрати енергії на одиницю продукції (що отримується) є основним техніко-економічним показником подріблювальних машин.

Розробка питань, пов'язаних з визначенням затрат енергії на подрібнення, є доволі складна задача бо затрати енергії залежать від цілого ряду факторів, які змінюються за процес роботи і важко піддаються розрахунку.

Вирішальний вплив на процес подрібнення мають сили, що діють між частинками (міжкристалічні сили), оскільки руйнування відбувається у найбільш слабких місцях - площинах спайності. Точне визначення величини міжкристалічних сил і створення єдиної теорії подрібнення зумовило появу різних гіпотез і є основною з ключових задач над вирішенням яких працює велика кількість інженерів.

Складність вирішення цієї задачі полягає у великому числі параметрів, які визначають процес руйнування матеріалу (розміру, форми, наявності тріщин, взаємного розташування шматків, крихкості, міцності, однорідності вихідного матеріалу, його вологості, виду і стану робочих поверхонь машини). Тому залежність для визначення енерговитрат може бути представлена тільки в загальному вигляді, але існуюча вели-

ка кількість емпіричних залежностей не дає чіткого уявлення відносно процесу руйнування, а є показником окремих технологій руйнування, які також не мають теоретичного підґрунтя, так як процес руйнування матеріалу повинен бути обґрунтований законами будови і руйнування твердих тіл.

Мета статті – аналіз енергоємності процесу подрібнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Для визначення енергії відомо чотири основні закони.

Розглянемо більш детально ці закони.

1. Закон поверхонь, запропонований П. Рітінгером, формулюється наступним чином: “Робота витрачена на подрібнення, прямо пропорційна поверхні кусків продукту, отриманої в процесі подрібнення”

$$A_{уд} = k \cdot \Delta S_{уд}, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, Нм/м²; $\Delta S_{уд}$ – величина новоутвореної поверхні, м².

При подрібненні кубічного куска розміром D з визначеною ступінню подрібнення і величина новоутвореної поверхні буде

$$\Delta S_{уд} = 6 \left(\frac{D}{i} \right)^2 \cdot \frac{D^3}{\left(\frac{D}{i} \right)^3} - 6D^2 = 6D^2(i-1), \quad (2)$$

де $\frac{D}{i}$ - розмір кубічного куска подрібнено-

го продукту; $\frac{D^3}{(D/i)^3}$ - кількість кубічних

кусків, утворених при подрібненні із висхідного куска.

Робота подрібнення одного куска буде дорівнювати

$$A_{уд} = k \cdot \Delta S_{уд} = 6k(i-1)D^2 = k_r D^2. \quad (3)$$

Цей закон застосовують у тих випадках коли степінь подрібнення матеріалів досягає вельми великих значень, а об'єм подрібнюваного тіла відносно невеликий, тобто при тонкому помелу.

2. Закон подрібнення Кіка-Кірпічева, закон об'ємів: "Енергія, необхідна для однакового подрібнення форми геометрично подібних тіл, пропорційна об'ємам або масам цих же тіл", тобто

$$A = \frac{\sigma_{ст}^2 \cdot V}{2E}, \quad (4)$$

де A – робота деформації, Нм; $\sigma_{ст}$ - межа міцності, Н/м²; E – модуль пружності при стиску, Н/м².

Якщо прийняти, що $k_K = \frac{\sigma_{ст}^2}{2E}$ - коефіцієнт пропорційності, то формулу можна записати у наступному вигляді

$$A = k_K V = k_K D^3, \quad (5)$$

де k_K - коефіцієнт пропорційності, Нм/м³; V – об'єм кубічного куска з ребром D .

Аналізуючи приведені вище закони, необхідно виділити наступне: закон Кірпічева-Кіка враховує затрати енергії на пружну, а потім пластичну деформацію тіла і зовсім не враховує витрат енергії на утворення нових поверхонь, на подолання сил зовнішнього і внутрішнього тертя, на втрати енергії, пов'язані з акустичним, електричним і тепловим явищами. Закон Ріттингера, навпаки, не враховує затрати енергії на пружну і пластичну деформації тіла і враховує тільки витрати енергії для утворення нових поверхонь.

Із наведеного вище виходить, що за процес подрібнення, коли утворення нових поверхонь практично незначне, слід застосо-

увати закон Кірпічева-Кіка, тобто точна відповідність гіпотези при крупному подрібненні, змінювалась великим відхиленням при середньому подрібненні і повною невідповідністю при помелу. Тому у випадку помелу матеріалу при інтенсивному утворенні нових поверхонь ця гіпотеза майже не застосовується.

3. Ф. Бонд вважав, що витрачена робота повинна включати роботу деформації (деформація об'єму) і утворення нових поверхонь (поширення тріщин). Теорія Бонда вказує на те, що енергія, яка передається тілу під час стиску, розподіляється спочатку по його масі і відповідно пропорційна D^3 , але з моменту початку утворення на поверхні тріщин ця енергія концентрується на поверхні по краях тріщин, і тоді вона пропорційна D^2 . За цією основою приймається, що робота руйнування пропорційна середньому геометричному із об'єму і поверхні куска, тобто

$$A = k_{пр} \sqrt{D^3 D^2} = k_{пр} D^{2,5}, \quad (6)$$

де A – робота, витрачена на подрібнення; D – лінійний розмір куска;

$k_{пр}$ – коефіцієнт пропорційності.

Загальний вигляд рівняння Ф. Бонда:

$$A = k \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right), \quad (7)$$

де d_{80}, D_{80} - розміри отворів сит, через які проходить 80% матеріалу відповідно до і після подрібнення.

Ф.Бонд також запропонував свою модель руйнування шматка матеріалу. Спочатку дробильні елементи стискають матеріал, під дією зусиль елемент деформується і поглинає енергію. При перевищенні в будь-якій точці руйнуючого напруження утворюється тріщина, енергія якої перетворюється в роботу по розширенню тріщини, внаслідок чого частинка розколюється. Виникнення першої тріщини відбувається внаслідок локального досягнення граничних значень зусиль в структурі матеріалу. Ф. Бонд робить припущення і прирівнює границю пружності крихкого матеріалу до границі міцності, таким чином стверджуючи, що для утворення першої тріщини, ене-

ргія накопичується у вигляді енергії пружних напружень. Переміщення енергії до країв тріщини приводить до концентрації напружень в інших місцях внаслідок чого утворюються додаткові тріщини і розриви. Але сила стиску може бути прикладена так швидко, що тріщина в частинці виникає до встановлення рівномірного розподілення енергії, внаслідок чого зменшується кількість енергії необхідної для руйнування. Тобто робота, на думку Ф.Бонда, що витрачена на руйнування шматка матеріалу є робота, яка витрачається на утворення першої тріщини.

Модель Ф.Бонда є недосконалою, бо вона не враховує: пластичні ефекти, порівнявши границю пружності і міцності матеріалу, властивості мікропружності і макропружності зразка.

Закон Ю.Бонда застосовується взагалі для зони, яка знаходиться між зонами мілкового подрібнення і грубого помелу.

Дж. Свенсен і Дж. Мюркес, аналізуючи формулу Ф.Бонда запропонували свій варіант:

$$A = E_0 \left(\sqrt{100/k_{80}} - \sqrt{100/k_{80f}} \right), \quad (8)$$

де E_0 - фактор пропорційності; k_{80} - розмір чарунок сита, крізь які проходить 80% продукту подрібнення; k_{80f} - розмір чарунок сита, крізь яке проходить 80% висхідного матеріалу.

Після проведення дослідів Дж. Свенсен і Дж. Мюркес узагальнили формулу і прийшли до висновку, що не слід пов'язувати кількість затраченої енергії з розміром шматків, відповідним процентом проходження, і що критерієм процесу подрібнення, є середній розмір шматків для будь-якого процента проходження. Остаточно формула набула такого вигляду:

$$A = E_0 \left[\left(\frac{100}{k_m} \right)^m - \left(\frac{100}{k_m} \right)^m \right], \quad (9)$$

де m - показник степеня, $m=0,8-1,3$.

Тут k_m визначається за формулою

$$\lg k_m = \frac{1}{5} [\lg k_{90} + \lg k_{70} + \lg k_{50} + \lg k_{30} + \lg k_{10}], \quad (10)$$

де $k_{90} - k_{10}$ - розміри граничних частинок, менше яких, за розміром містяться відповідно 90, 70, 50, 30, 10%.

Е. Пірет проробив ряд досліджень за ударним і квазістатичним руйнуванням кварцу, намагаючись підтвердити модель Ф.Бонда.

На його думку критичні напруження при малих концентраціях енергії виникають тільки в деяких точках, як наслідок відбуваються протяжні розриви з утворенням невеликої кількості частинок з великою площею поверхні (повільний стиск). При великих концентраціях енергії критичне напруження швидко і послідовно зростає в ряду точок. Розриви поширюються на малі відстані, новоутворена поверхня мала але утворена за рахунок багатьох частинок. В другому випадку витратиться більше енергії ніж в першому. Перевищення по площі новоутвореної поверхні є 19-кратним при низьких концентраціях енергії (повільний стиск).

На основі дослідів Е. Пірет зробив висновок, що навіть при малих концентраціях енергії (повільний стиск) завжди відбуваються її великі втрати.

П.А.Ребіндер об'єднав закони Рітінгера і Кірпічева-Кіка, вважаючи, що руйнування настає після деформації куска і повна робота дроблення дорівнює сумі роботи деформації і роботи утворення нових поверхонь.

Основні положення теорії Ребіндера наступні: при деформації твердих тіл за період, безпосередньо передуючий його руйнуванню, тобто за період пружних і пластичних деформацій, накопичується об'ємна енергія, яка при досягненні критичного значення приводить до руйнування твердих тіл. Фізично цей процес виражається в утворенні тріщин в місцях дефектів структури матеріалу, за яких і відбувається руйнування. Закон П.А.Ребіндера математично можна виразити в наступному вигляді:

$$A = k_{пр.1} \Delta F + k_{пр.2} \Delta V, \quad (11)$$

де A - робота, витрачена на руйнування твердого тіла, дж; $k_{пр.1}$ - коефіцієнт пропорційності, н/м; ΔF - новоутворена при руйнуванні поверхня, m^2 ; $k_{пр.2}$ - коефіцієнт

пропорційності, н/м^2 ; ΔV - деформована частина об'єму тіла, м^3 .

Гіпотеза П.Рейбіндера була доповнена складовою зовнішнього тертя і представлена у вигляді:

$$A = K_1 D^3 + K_2 D^2 + K_f D, \quad (12)$$

де K_1, K_2, K_f - відповідно коефіцієнти пропорційності для утворення нової поверхні, залишкової деформації і зовнішнього тертя.

А.К. Рундквіст запропонував таку узагальнюючу формулу

$$dA = k' d(D^{4-k}), \quad (13)$$

де $(4-k)$ - показник ступеня, який визначається дослідним шляхом.

Продиференціювавши залежність отримаємо

$$dA = (4-k)k' D^{3-k} dD. \quad (14)$$

Якщо припустити, що вся маса матеріалу, який має загальний об'єм Q , складається із однакових за розміром шматків, то загальне число шматків

$$n = \frac{Q}{D^3}. \quad (15)$$

Тоді елементарна робота

$$dA = ndA = \frac{Q}{D^3} (4-k)k' D^{3-k} dD = k_0 Q \frac{dD}{D^k}, \quad (16)$$

де k_0 - стала.

За зміною розміру шматка матеріалу від D_0 (початковий) до D_k (кінцевий) повна робота в загальному випадку буде дорівнювати:

$$A = -k_0 Q \int_{D_0}^{D_k} \frac{dD}{D^k} = -\frac{k_0 Q}{1-k} [D^{1-k}], \quad (17)$$

і остаточно робота (формула А.К. Рундквіста)

$$A = \frac{k_0 Q}{k-1} \left[\frac{1}{D_k^{k-1}} - \frac{1}{D_0^{k-1}} \right]. \quad (18)$$

Із загальної формули А.К. Рундквіста можна отримати всі часткові випадки, приймаючи для показника k відповідні числові значення: для гіпотези Ріттінгера $k=2$; для гіпотези Ф. Бонда $k=1,5$. Для гіпотези Кірпічева-Кіка при $k=1$ формула А.К.Рундквіста приводить до невизначено-

сті $\frac{0}{0}$. Тому слід повернутись до рівняння

(14) і прийняти $k=1$, тоді:

$$A = \int dA = k_0 Q \int_{D_0}^{D_k} \frac{dD}{D} = k_0 Q |\ln D|. \quad (19)$$

Звідки

$$A = k_0 Q \lg \frac{D_0}{D_k} = k_0 Q \lg i. \quad (20)$$

Більш універсальну узагальнюючу формулу запропонував проф. Блохін В.С.:

$$dE' = -k \frac{dx}{x^n}, \quad (21)$$

де E' - питома енергія, надана одиниці об'єму тіла, що руйнується, необхідна для приросту енергії новоутвореної поверхні; k - коефіцієнт пропорційності; x - середній діаметр зерен; n - коефіцієнт, який залежить від діапазону крупності і способу подрібнення.

Геометрична інтерпретація цього виразу зображена на рис. 1.

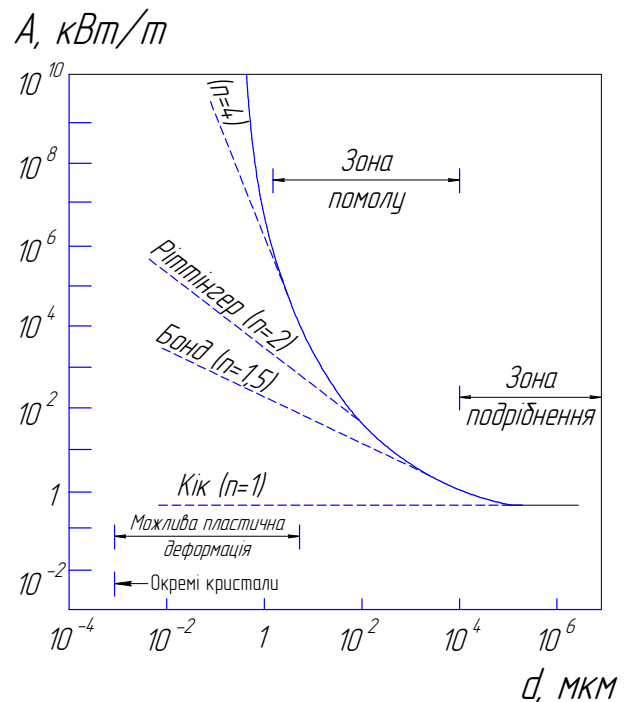


Рис.1 Залежність питомої витрати енергії E' від крупності твердих частинок матеріалів, що руйнуються

Шляхом інтегрування диференціального рівняння загальної гіпотези ми можемо отримати відомі гіпотези:

П.Ріттінгера при $n=2$; Кірпічева-Кіка при $n=1$; Ф.Бонда при $n=1,5$.

Механізм руйнування, на думку В.С. Блохіна, наступний. На початковій стадії взаємодії інструмента з породою відбувається їх пружна деформація в зоні контакту, потім в місці їх зіткнення утворюється невелика вм'ятина (деформація стиску, викликаючи мікроруйнування породи). Останнє відбувається при порівняно невеликих навантаженнях (10-30% від навантаження, необхідного для здійснення повного руйнування). Із збільшенням навантаження до 40-50% від руйнуючого формуються кільцеві тріщини, які розповсюджуються концентричними колами навколо зони контакту, і які супроводжуються видавлюванням породи по цим тріщинам і крихким сколам (розтягнення). Одночасно починається формуватись ядро попереднього руйнування. При збільшенні навантаження появляються конічні тріщини, які розповсюджуються в середину породи від поверхні контакту (розтягнення). Ці тріщини розділяють навантажену породу на два конуса (внутрішній і зовнішній). Ядро ущільнення (попереднього руйнування) повністю вписується у внутрішній конус. Подальше збільшення навантаження до 60-80% від руйнуючого викликає зорстання площадки контакту, зародження і руйнування по новим концентричним тріщинам, крихке руйнування породи в ядрі (порода стирається в порошок) і розвиток конічних тріщин. По мірі подальшого навантаження внутрішній конус і ядро збільшуються, зазнаючи всебічний стиск, відбувається інтенсивне утворення тріщин (стиск), викликаючи розширення об'єму конуса і ядра. Останні, виконуючі роль клина, розривають зовнішній конус (розтягнення). Руйнування відбувається вибухоподібним чином із значним розльотом відколених частин породи. При цьому навантаження, які припадають на руйнування зовнішнього конуса, в 20 раз менше, чим навантаження, прикладені до зруйнованої гірської породи (100%), при цьому, до 80% всього навантаження витрачається тільки на підготовку до руйнування зовнішнього конуса, формування ядра попереднього руйнування (усестороннього

стиску) і розвиток внутрішнього конуса, а всього на підготовку до руйнування шматка гірської породи – до 95%.

Цікаву енергетичну гіпотезу висловив Р.А.Родін.

Він встановив, що процес руйнування шматка гірської породи правильної форми з ізотропними властивостями складається із наступних стадій (рис.2):

- 1) Поява контактів і виникнення пружних деформацій (1-0);
- 2) Утворення зони всебічного стиску її збільшення і формування до моменту появи ефективної тріщини (1-2);
- 3) Виникнення ефективної тріщини і її розвиток до критичних розмірів (2-3);
- 4) Швидкісний розвиток ефективної тріщини до повного руйнування подрібнюваного шматка (3-4) і повної витрати пружної енергії.

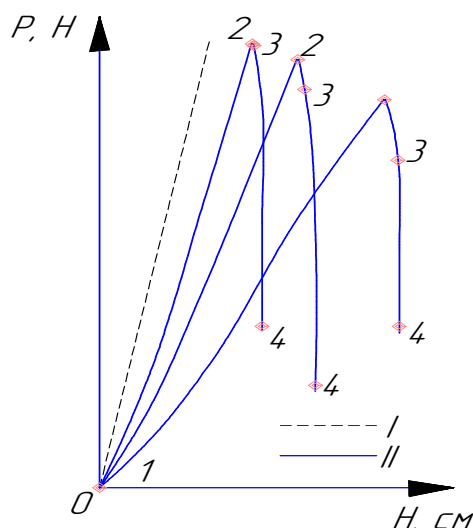


Рис.2 Руйнування пружно-крихкого тіла за Р.А.Родіним:

I – деформація преса;

II – руйнування зразків різної міцності

Було встановлено, що велика частина енергії витрачається на пружну деформацію самої системи – дробарки або преса. (На прикладі рис. 2, 80% енергії затрачується на деформування преса при подрібненні міцного вапняку). Розподіл енергії по стадіям руйнування є таким: 1 – 10%; 2 – 73,4%; 3 – 22,5%; 4 – 4,4%.

Схема руйнування матеріалу за Р.А.Родіним є наступною.

Спочатку в зоні дії сили утворюється площадка контакту і відбувається пружній стиск. Після досягнення визначених зусиль починається місцеве руйнування з утворенням зони всебічного стиску конічної форми. По мірі збільшення зусиль збільшується площа контакту і відповідно об'єм конуса.

Простір в середині зони всебічного стиску складається із частинок, які складають 97% всієї новоутвореної поверхні руйнування. Ці частинки підлягають сильним навантаженням, ефективному тертю між собою, при формуванні і розширенні зони стиску і утворенню ефективної тріщини, на що і витрачається (95%) енергії.

Р.А.Родін запропонував математичний вираз витрат роботи на подрібнення шматка матеріалу правильної форми з ізотропними властивостями:

$$A_{RR} = \frac{3}{8 \cdot k_{\phi}^2 \cdot k_B^2 \cdot \sigma_{ст.к}} \times \frac{\sigma_p^2}{tg^2 \alpha \cdot R^{0,25-0,01R}}, \quad (22)$$

де σ_p - межа міцності матеріалу під час розколу; k_{ϕ} - коефіцієнт форми в зоні контакту, границі зміни 0,318-0,5; k_B - коефіцієнт пропорційності; $\sigma_{ст.к}$ - граничне напруження під час стиску; $tg \alpha$ - коефіцієнт тертя; R - радіус руйнування шматка.

Запропонована гіпотеза може бути сформульована таким чином: робота, затрачена на одиничне руйнування шматка гірської породи, пропорційна роботі, затраченій на утворення нових поверхонь і тертю між утвореними поверхнями в зоні всебічного стиску.

Висновок

З наведених вище законів слід зазначити, що не один з них не дає точного уявлення про руйнування матеріалу. Закон Рітінгера враховує степінь подрібнення, обумовлену приростом новоутворених поверхонь, але до теперішнього часу ще не визначена одинична робота A_0 , яка відповідає одиниці приросту поверхні для різних матеріалів.

Закон Кірпічева – Кіка враховує роботу деформацій до моменту отримання першої тріщини, але не враховує степінь подрібнення.

За законом Ребіндера враховуються степінь подрібнення, робота деформації і зовнішнє тертя, але не вказані методи визначення кількості циклів повторень знакозмінних зусиль для повного руйнування матеріалу.

Тому всі розглянуті закони ґрунтуються на процесі подрібнення тіл правильної геометричної форми під дією рівномірно розподілених стискаючих навантажень, фактично ж руйнування матеріалу відбувається під дією зосереджених навантажень. Тому застосування законів для розрахунку дробильно-помольних машин ускладнене і потребує введення додаткових поправкових коефіцієнтів.

Література

1. Назаренко І. І. Машини для виробництва будівельних матеріалів: Підручник. – К.: КНУБА, 1999. – 488 с.
2. В.С. Блохин, В.И. Большаков, Н.Г. Малич. Основне параметры технологических машин. Машины для дезинтеграции твердых материалов: Пособие. ч. I – Днепропетровск: ИМА-пресс. – 2006. – 404 с.
3. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации (Б.В. Клушанский, А.И. Косарев, Ю.А. Муйземнек. – М.: Маш-ние, 1990. – 320 с.
4. Олевский В.А. Конструкция, расчет и эксплуатация дробилок. Металургиздат, 1958.
5. Сапожников М. Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. Учеб. для строительных вузов и факультетов. М., “Высш. школа”. 1971. 382 с.

Рецензент: Л.Є. Пелевін, к.т.н, проф.
(КНУБА, Київ)

Одержано: 05.05.2010 р.