

ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ЕНЕРГІЇ, НЕОБХІДНОЇ ДЛЯ ДЕЗІНТЕГРАЦІЇ ГІРСЬКИХ ПОРІД ДО ПЕВНОГО РОЗМІРУ

Анотація. Проведено аналіз існуючих класичних теорій визначення кількості енергії, необхідної для дезінтеграції твердих тіл. Кожна з них реалізує тільки невелику частку спектру умов дроблення та подрібнення гірських порід. В той же час вони практично не враховують контактне тертя між інструментом та породою. Авторами запропоновано використовувати нову теорію локального руйнування гірської породи при симетричному і асиметричному розподілу контактних дотичних напружень, яка теоретично забезпечує зниження питомої енергії руйнування в 40 - 45 разів, що дозволяє шукати нові шляхи керування процесом дезінтеграції при найменших витратах енергії

Ключові слова: гірські породи, класичні енергетичні теорії руйнування, зразок, контактне тертя, дотичні напруження, асиметрія, енергія руйнування.

Вступ. Відомо, що збагачення корисних копалин проводиться шляхом поділу мінеральних асоціацій, що мають певні технологічні властивості по мінеральному складу. Якщо на початку XX ст. ефективно збагачувалися руди з верхньою межею подрібнення гірської породи 1 мм, то вже в 30-і роки для всіх типів руд це було знижено на порядок, а в даний час деякі руди ефективно збагачують при подрібненні до 50 мкм. Складність полягає в тому, що при переході від крупності подрібнення 1 мм до 50 мкм, сумарна поверхонь подрібненої породи зростає на 2 - 3 порядки, а при зниженні лінійних розмірів зерен руди, подрібненої до 10 мкм, вона збільшується вже на 4 порядки.

При цьому необхідно мати на увазі низьку ефективність (перш за все енергетичну) існуючих масових технологій руйнування: навіть найбільш досконалі з них «використовують» менш 1% енергії, що підводиться. І це при тому, що витрати енергії на дроблення та подрібнення гірських порід, вже сьогодні становлять десятку частину всієї вироблюваної в країні електроенергії. Такі витрати продовжують стрімко зростати.

Загальна кількість матеріалів, які щорічно піддаються в нашій країні дезінтеграції, становить близько 1 млрд. т. При цьому в структурі капітальних

вкладень на збагачувальне виробництво на частку дробильно-подрібнювальних відділень припадає 50 - 65% загальних витрат [1].

Кількість енергії, необхідної для подрібнення будь-якого матеріалу до певного розміру, залежить від багатьох факторів - розміру, форми, взаємного розташування шматків, міцності, крихкості, однорідності вихідного матеріалу, його вологості, виду і стану робочих поверхонь машини та ін. [1] Тому встановити аналітичну залежність між витратою енергії на подрібнення, фізико-механічними властивостями матеріалу, що подрібнюється і результатами процесу можна лише в найзагальнішому вигляді.

Основна частина. Класичні енергетичні гіпотези руйнування Ріттінгера, Кіка- Кирпичова та Бонда [2], можна об'єднати формулою так званої узагальнюючої гіпотези

$$dE^1 = -k \frac{dx}{x^{f(x)}},$$

де E^1 - питома енергія, що передається одиниці об'єму тіла, яке руйнується. Вона необхідна для приросту енергії новоствореної поверхні; k - коефіцієнт пропорційності; x - середній діаметр зерен; $f(x)$ - показник ступеня, що залежить від крупності частинок.

Диференціальне рівняння може бути представлено в більш простій формі

$$dE^1 = -k \frac{dx}{x^n},$$

де n - коефіцієнт, який залежить від діапазону крупності і способу дроблення (подрібнення).

На рис. 1 показана геометрична інтерпретація виразу - узагальнена форма теоретичних і емпіричних рівнянь Ріттінгера, Кіка, Кирпичова, Бонда, Свенсона, Холмса та інших авторів.

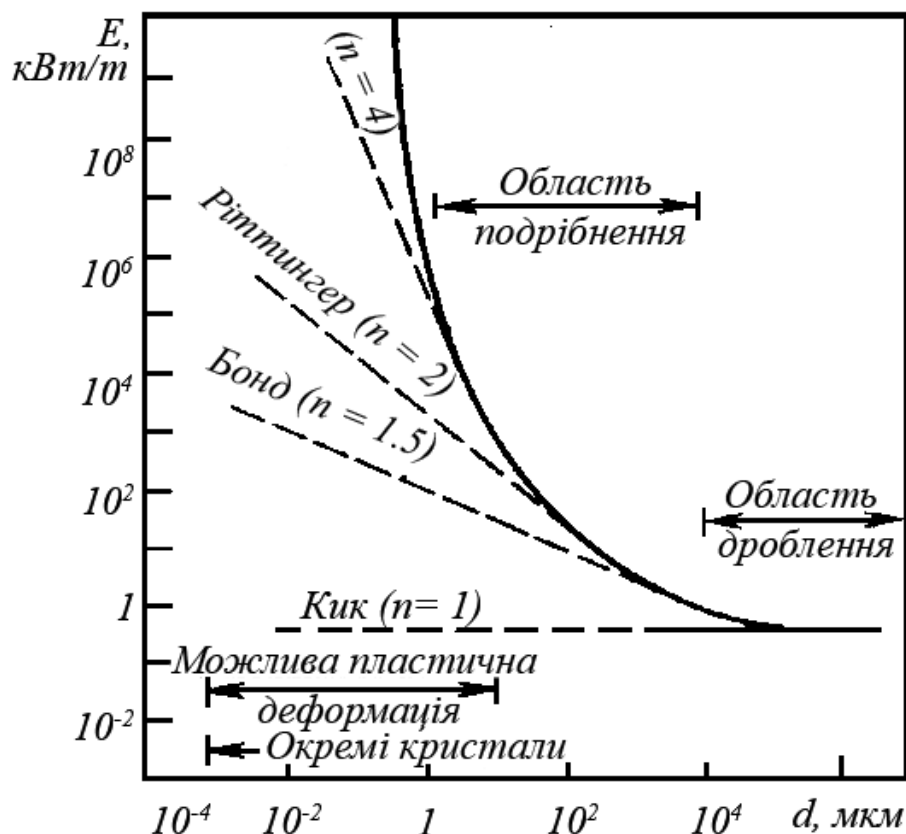


Рисунок 1 - Залежність питомого витрату енергії E^I від крупності часток твердих матеріалів, які руйнуються

Розглянемо викладені вище гіпотези з урахуванням рівняння узагальнюючої гіпотези.

П. Ріттінгер встановив, що енергія руйнування пропорційна новоствореній поверхні $E^I = k_1 (S_k - S_n) = k_1 \Delta S$, де S_k , S_n - поверхня матеріалу до і після руйнування, m^2 ; k_1 - коефіцієнт пропорційності, $Нм/м^2$.

Це рівняння може бути отримано шляхом інтегрування диференційного рівняння узагальнюючої гіпотези при $n = 2$,

$$E^I = k_2 \left(\frac{1}{d_{cp}} - \frac{1}{D_{cp}} \right),$$

де D_{cp} і d_{cp} - середня крупність частинок відповідно вихідного і дробленого продукту.

Розмір новоствореної поверхні можна відобразити через початкові і кінцеві розміри дробленого матеріалу, і якщо дробленню піддається не один шматок, а Q (m^3) матеріалу з середнім розміром шматків, рівним D_{cp} , то остаточна формула Ріттінгера буде мати слідуючий вигляд

$$E^I = K_R (i - 1) Q / D_{cp}.$$

Визначити коефіцієнт пропорційності K_R між витраченою роботою і знову оголеною поверхнею тут вельми важко, що, безумовно, знижує практичне значення цієї формули. Площа поверхні пухкого матеріалу, що складається з окремих шматків, залежить від їх крупності. Замінімо дійсно пухкий матеріал ідеальним, в якому всі шматки мають однаковий середній розмір і однакову правильну, наприклад кубічну, форму. Тоді маса одного шматка буде

$$G = \rho d_{cp}^3,$$

де ρ - щільність матеріалу; d_{cp} - середній діаметр шматків. Число шматків в Q тоннах матеріалу $N = Q / d_{cp}^3 \delta$.

Поверхня одного шматка $s = 6 d_{cp}^2$. Поверхня Q тон пухкого матеріалу $S = s N Q = 6 d_{cp}^2 Q / (\delta d_{cp}^3) = 6 Q / \delta d_{cp}$. Питома поверхня пухкого матеріалу

$$s_n = S/Q = 6/\delta d_{cp}.$$

Питома поверхня пухкого матеріалу зворотно-пропорційна розміру шматків і може служити мірою крупності матеріалу. Формулу можна застосувати для визначення питомої поверхні дійсного пухкого матеріалу, що складається з шматків різного розміру і різної форми.

Рівняння гіпотези Кирпичева-Кіка може бути отримано також з диференційного рівняння узагальнюючої гіпотези інтеграцією його в тих же межах при $n=1$

$$E^1 = k_2 \ln \left(\frac{D_{cp}}{d} \right) = k_2 \ln i,$$

де 1 - ступінь скорочення

Якщо прийняти, що на дроблення надходить Q (кг) матеріалу із середнім розміром шматків D_{cp} то остаточно, виконавши відповідні перетворення, будемо мати

$$E^1 = K_k Q \ln \left(\frac{D_{cp}}{d} \right).$$

Отримана формула відображає математичну залежність гіпотези Кирпичева-Кіка.

Після опублікування зазначених гіпотез дроблення з'явилися роботи, присвячені їх аналізу і порівнянню. Думки вчених розділилися. Одні вважали, що гіпотези Кирпичова-Кіка і Ріттінгера справедливі для різних стадій подрібнення: гіпотеза Кирпичова-Кіка визначає енергію, яка витрачається на пружну деформацію матеріалу і не враховує новоствореної поверхні, і тому гіпотеза справедлива для процесів дроблення, де основна енергія витрачається на деформацію матеріалу; гіпотеза Ріттінгера не враховує витрати енергії на

пружну деформацію і більш підходить для процесів помелу, де переважає стирання з інтенсивною появою нової поверхні.

Інші вчені стверджували, що неправильно використовувати гіпотези Кирпичова-Кіка і Ріттінгера окремо для різних стадій процесу подрібнення. Ці закони доповнюють один інший і діють спільно.

У 1940 році академік П. Ребиндер запропонував формулу витрати енергії при подрібненні, в якій сумуються роботи, які витрачаються на деформацію руйнування шматків, і на появу поверхонь

$$E^I = KAV + K_0AF,$$

де K , K_0 - коефіцієнти пропорційності; ΔV - деформований обсяг; ΔF - новостворена поверхня.

Надалі гіпотеза П. Ребиндера була доповнена складовою зовнішнього тертя і представлена у вигляді

$$E^I = KD^3 + K_0 D^2 + K_r D,$$

де K , K_0 , K_r - відповідно коефіцієнти пропорційності для появи нової поверхні, надлишкової деформації і зовнішнього тертя; D - середній розмір подрібнюваних шматків.

Формула П. Ребиндера не отримала широкого розповсюдження через відсутність надійних рекомендацій по методиці вибору значень коефіцієнтів пропорційності для конкретного випадку.

В результаті обробки даних численних серій дослідів, що охоплюють широкий діапазон руд, Ф. Бонд знайшов, що

$$E^I = k_4 \left(\frac{1}{\sqrt{d_{cp}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{cp}}} \right).$$

Загальний вид рівняння, яке використовувалось Ф. Бондом

$$E^I = k_4 \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right),$$

де D_{80} и d_{80} — розмір отворів сита, через які проходить 80% матеріалу відповідно до і після дроблення.

Рівняння можуть бути отримані з диференційного (аналогічно викладеним вище) при його інтегруванні для $n = 1,5$. Відповідно до цієї гіпотези елементарна робота, що витрачається при дробленні, пропорційна збільшенню середньгеометричним між обсягом і знов оголеною поверхнею

$$E^I = K_6 d (\sqrt{VF}),$$

де K_6 - коефіцієнт пропорційності.

Якщо позначити через W (індекс роботи) ту роботу, яку потрібно затратити для доведення одиниці об'єму матеріалу, що складається з шматків бескінечних розмірів, до крупності, при якій 80% шматків мають діаметр $D_k = 100$ мкм, то

$$W = A_0 / Q_0 = K_B \left(\frac{1}{\sqrt{100}} - \frac{1}{\sqrt{\infty}} \right) = 0.1 K_B, \text{ тоді } K_B = 10 W.$$

Роботу на одиницю об'єму можна визначити за следуючею розрахунковою формулою

$$E^1 = \frac{A_0}{Q_0} = 10W \left(\frac{1}{\sqrt{D_k}} - \frac{1}{\sqrt{D_0}} \right) = \frac{10W \left(\sqrt{D_0} - \sqrt{D_k} \right)}{\sqrt{D_0 D_k}}.$$

У формулах Бонда діаметри D_0 і D_k виражені в мікрометрах і рівні тим отворам сита, на яких залишок дорівнює 20% (просів 80%).

Замість обсягу Q_0 в формули можна ввести пропорційну йому величину - масу матеріалу Q . Тоді індекс роботи W і питома витрата енергії $E^1 = A_0/Q_0$ будуть відноситись до 1 т матеріалу

$$E_B^1 = \frac{A_0}{Q_0} = \frac{10W_i \left(\sqrt{D_0} - \sqrt{D_k} \right)}{\sqrt{D_0 D_k}}.$$

Інтерес до гіпотези Ф. Бонда привів до того, що Дж. Свенсен і Дж. Мюркес в 1957р запропонували свій варіант формули, який, на їхню думку, краще узгоджується з експериментальними даними. Спочатку вони надали формулі Ф. Бонда такий вигляд:

$$E = E_0 \left(\sqrt{\frac{100}{k_{80}}} - \sqrt{\frac{100}{k_{80f}}} \right),$$

де E - витрати енергії, необхідної для подрібнення; E_0 - фактор пропорційності; k_{80} - розмір осередку сита, крізь яке проходить 80% продукту подрібнення; k_{80f} - розмір осередку сита, крізь яке проходить 80% вихідного матеріалу.

Крім того, коли завантаження є відсіяною фракцією, вони рекомендують внести поправку в величину k_{80f} завантаження і замінити її величиною k_{80fn} , яка витікає з формулы:

$$k_{80f} = \frac{k_{80f}}{\left[2 - \left(\frac{k_0}{k_{80f}} \right)^{\sqrt{2}} \right]^{\sqrt{2}}},$$

де k_n - розмір, до якого проводиться розсівання після видалення всіх дрібних фракцій.

Зображуючи для ряду дослідів $\sqrt{\frac{100}{k_{80f}}}$ як функцію E , Дж. Свенсен і Дж. Мюркес отримали не тільки серію прямих, а й криві лінії, що спонукало їх узагальнити первинний варіант та записати модифіковану формулу Ф. Бонда у вигляді

$$E = E_0 [(100 / k_{80})^m - (100 / k_{80f})^m].$$

Значення m в пророблених дослідах коливалося від 0,8 до 1,3.

Крім того Дж. Свенсен і Дж. Мюркес знайшли формулу справедливою не тільки для розмірів частинок, відповідних 80% проходження через сито, але також для будь-яких інших (за умови, що E_0 і m є функціоналами відсотка проходження частинок). Вони прийшли до висновку, що не варто пов'язувати кількість енергії, що витрачається з розміром частинок, відповідним відомому відсотку проходження, і що більш відповідним критерієм процесу подрібнення є середній розмір частинки для будь-якого відсотка проходження. Тому остання запропонована ними формула має такий вигляд:

$$E = E_0 [(100 / k_{80})^m - (100 / k_m)^m].$$

Тут k_m визначається за формулою

$$lgk_m = \frac{1}{5[lgk_{90} + lgk_{70} + lgk_{50} + lgk_{30} + lgk_{10}]},$$

де k_{90} і k_{10} - розміри, менше яких міститься відповідно 90, 70, 50, 30 і 10% часток.

У 1954р А.К. Рундквіст (інститут «Механобр») запропонував узагальнюючу формулу, по якій елементарна робота дроблення одного шматка матеріалу пропорційна елементарній зміні деякої міри його розміру D ,

$$dE_0 = Kd(D^{4-n}),$$

де K - коефіцієнт пропорційності; $4-n$ - показник ступеня, який визначається експериментально.

Беручи в цій формулі показник ступеня n , рівним 2; 1,5; 1, можна отримати відповідно формули гіпотез Ріттінгера, Бонда і Кирпичова - Кіка.

У 1957р Дж. Холмс, вважаючи, що теорія Ф. Бонда, надзвичайно корисна для визначення кількості енергії, необхідної для промислового подрібнення, запропонував модифіковане емпіричне рівняння, що зв'язує енергію, необхідну для подрібнення частинки, з її розміром. Це рівняння має вигляд

$$E = K [1 - (1/R)^z (100/a)^z],$$

де E - енергія, що витрачається при подрібненні; K - показник подрібнення; R - ступінь подрібнення; a - розмір часток; z - показник ступеня відхилення.

Величина z відображає ступінь зміни опору матеріала подрібненню і зміну ефективності машини зі зміною розміру часток. Його значення залежить від матеріалу і умов докладання зусиль. Рівняння може бути застосовано до крихких неоднорідних матеріалів.

Дж. Холмс розробив метод розрахунку значень K і z за результатами випробувань в кульових млинах для достатньо великого числа різних гетерогенних руд за допомогою емпіричного методу Ф. Бонда. При подрібненні будь-якого матеріалу в кульовому млині описаного типу значення K і z постійні в межах розглянутого розміру часток.

Природно, зазначає Дж. Холмс, розраховану з цього загального рівняння енергоємність подрібнення в даному кульовому млині, не можна використовувати для інших типів дробарок і млинів, так як поведінка матеріалу при подрібненні залежить не тільки від його природи, а й від деформуючих зусиль, що діють на нього

Значення z залежить від швидкості прикладання навантажень, енергії, яка поглинається при зіткненнях та накопичується ще до руйнування, напрямків деформуючих сил по відношенню до анізотропії частки, форми і розмірів частинок матеріалу, що руйнується і т. д.

Згідно термодинамічної теорії Л. Джінгезіана, сума доданої кінетичної енергії, необхідної для подрібнення матеріалу і внутрішньої теплової енергії матеріалу, що підлягає подрібненню, є постійною величиною.

Фізичні передумови цієї теорії такі. Частки, які складають обсяг такого гетерогенного матеріалу як руда, під впливом тепла розширюються неоднаково, що викликає внутрішні напруження в цьому обсязі, вони зростають з підвищенням температури. У результаті, на думку автора теорії, на дроблення нагрітої руди потрібно менше кінетичної енергії тієї в порівнянні з дробленням ненагрітої руди на значення енергії, витраченої на попередній нагрів.

Ця теорія, запропонована в 1952р, була перевірена на ряді випробувань з вапняком, мідно-нікелевими і свинцево-срібними рудами і кварцом.

Випробування підтвердили висновки теорії про збільшення площі знов утвореної поверхні з зростанням температури. Однак сталості суми кінетичної і теплової енергії не спостерігалось, причому загальні енерговитрати завжди виявлялися вище при дробленні з попереднім нагріванням.

Теорія моделей А. Андреазена (1953 р) дозволяє кількісно визначити параметри і процес роботи промислової дробильно-подрібнювальної машини по даним лабораторної машини. Неодмінною умовою правильного результату такого моделювання є виконання наступних положень: обидві машини повинні бути суворо подібні, мати одну і ту ж конструкцію і форму з постійними параметрами подоби; теорія застосовна тільки до крихких матеріалів, які руйнуються раніше, ніж буде перевершена межа пружності.

Теорія А. Андреазена ґрунтується на спостереженні за руйнуванням геометрично подібних тіл під дією статично подібних зовнішніх сил. Автор вважає, що сила, яка потрібна для руйнування матеріалу, характеризує природу цього матеріалу за умови, що зовнішні сили руйнують його раніше, ніж досягається межа пружності.

Головним контраргументом теорії моделей можна назвати той факт, що руйнування в дійсності - процес масштабно не подібний, суворо кажучи, навіть для ідеальних кристалів. Тим більше, цей процес масштабно не подібний для реальних твердих тіл з недосконалою кристалічною будовою, властивості яких помітно змінюються в залежності від розмірів. Проте, ця теорія в змозі дати приблизне уявлення кількісного характеру про роботу де-яких дробарок і млинів.

Всі наведені гіпотези подрібнення слід розглядати саме як гіпотези, але ніяк не закони, так як вони не підтверджуються практичними результатами процесу подрібнення, тим більше в широкому діапазоні властивостей матеріалу і крупності готового продукту.

Вони справедливі для спрощених моделей руйнування, заснованих на геометричній подібі частинок, які руйнуються і продуктів руйнування та їх фізичної ідентичності, при відсутності дефектів будови тіл.

Експериментальне зіставлення трьох класичних гіпотез, що характеризують зв'язок між енергоємністю дроблення і значущістю дробленого матеріалу, показує, що для подрібнення при великих питомих поверхнях краще за інших відображає дійсність формула П. Ріттінгера; для великого дроблення - гіпотеза В. Кирпичева - Ф. Кіка; формула Ф. Бонда може бути застосована при дробленні в проміжному діапазоні крупності.

Має досить широке поширення, особливо у західних фахівців, модель подрібнення Ф. Бонда, що враховує енерговитрати за допомогою так званого індексу роботи (витрати енергії в кВт*год на тону продукту для відповідних умов подрібнення), є фактом післядії і не пропонує активної зміни принципів і засобів руйнування.

Труднощі отримання універсального закону руйнування пояснюється тим, що в реальних тілах і кристалах зустрічаються дефекти у вигляді тріщин або ділянок неспівпадіння розташування атомів або вузлів кристалічної решітки (дислокацій), що є причиною виникнення тріщин. Внаслідок цих дефектів поперечні перерізи тіла стають нерівноцінними по міцності. На кінцях тріщин під впливом навантаження виникають локальні піки напружень, які значно більше середніх напружень в тілі.

Енергія, що підводиться до тіла при навантаженні, перетворюється в енергію деформації, накопичується в матеріалі, і в поверхневу енергію тріщини. Зі збільшенням довжини тріщини, напруження що виникають на її кінцях, зростають. При певних напруженнях тріщина буде поширюватися далі мимовільно.

Гріффітс отримав вираз, що зв'язує напруження σ з критичною довжиною тріщини, починаючи з якої тріщина розповсюджується мимовільно,

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}},$$

де E - модуль пружності матеріалу; γ - питома поверхня енергія тріщини. Практичне використання формули Гріффітса для характеристики зв'язку між роботою руйнування і розміром кінцевого продукту утруднено відсутністю співвідношення між розміром тіла і критичною довжиною тріщин. В даний час немає достатньо легких і надійних методів визначення розмірів дефектів, що існують в необроблених частинках гірських порід неправильної форми.

Як видно з аналізу викладеного, назріла гостра необхідність створення узагальненої і надійної математичної моделі, яка розкриває основні закономірності цих процесів. Хибність існуючих положень полягає в тому, що в основному автори розглядають процес подрібнення тільки як витрати, пов'язані з утворенням нової поверхні, без урахування частки внутрішнього і особливо зовнішнього тертя, які в сумі складають до 95 - 99% [3].

Найбільші втрати при руйнуванні викликані взаємним тертям частинок матеріалу, що переробляється з робочими органами машини. При цьому

відносні втрати на тертя тим більше, чим більше питома поверхня матеріалу (менше розміри частинок) і чим довше він перебуває в робочій камері.

У розумінні закономірностей розподілу витрат на подрібнення важливо знати, що вони залежать в першу чергу від природи речовини і способу руйнування: розчавлювання, вигин, стирання, удар і так далі. Консервативність галузі не дозволяє в потрібній мірі зробити об'єктивний висновок про енергетичну ефективність різних апаратів.

Все це свідчить про необхідність нових моделей, що описують закономірності подрібнення, в першу чергу математичних моделей, що описують різні види руйнування гірської породи.

Авторами [4] під керівництвом професора Васильєва Л.М. розроблено нову теорію локального руйнування гірської породи при симетричному і асиметричному розподілу контактних дотичних напружень, яка дозволяє керувати процесом руйнування при найменших витрат енергії.

Згідно запропонованої теорії при асиметрично спрямованих контактних дотичних напруженнях маємо позитивні знаки на контактних поверхнях при розвитку тріщин зверху вниз за траєкторіями максимальних ефективних дотичних напружень (ТМЕДН) ξ (рис.2,а) і негативні знаки - знизу вгору за ТМЕДН η (рис.2,б). Для побудови діаграми «питоме зусилля – ордината» для зразків гірської породи при асиметричних напрямках контактних дотичних напружень необхідно визначити питоме зусилля p на майданчику зразка, що не вийшов з-під навантаження.

Формула розподілу контактних нормальних напружень у цьому випадку має такий вигляд

$$\sigma_{y_i} = \sigma_{y_\xi} \cdot e^{\frac{f_k \cdot x}{g \cdot h_l}}.$$

де σ_{y_ξ} – нормальне напруження в кутовій точці тіла, що деформується; f_k – коефіцієнт контактного тертя; x – абсциса точки на контактній поверхні; h_l – висота тіла, яке деформується; g – параметр уточнення розподілу контактних дотичних напружень.

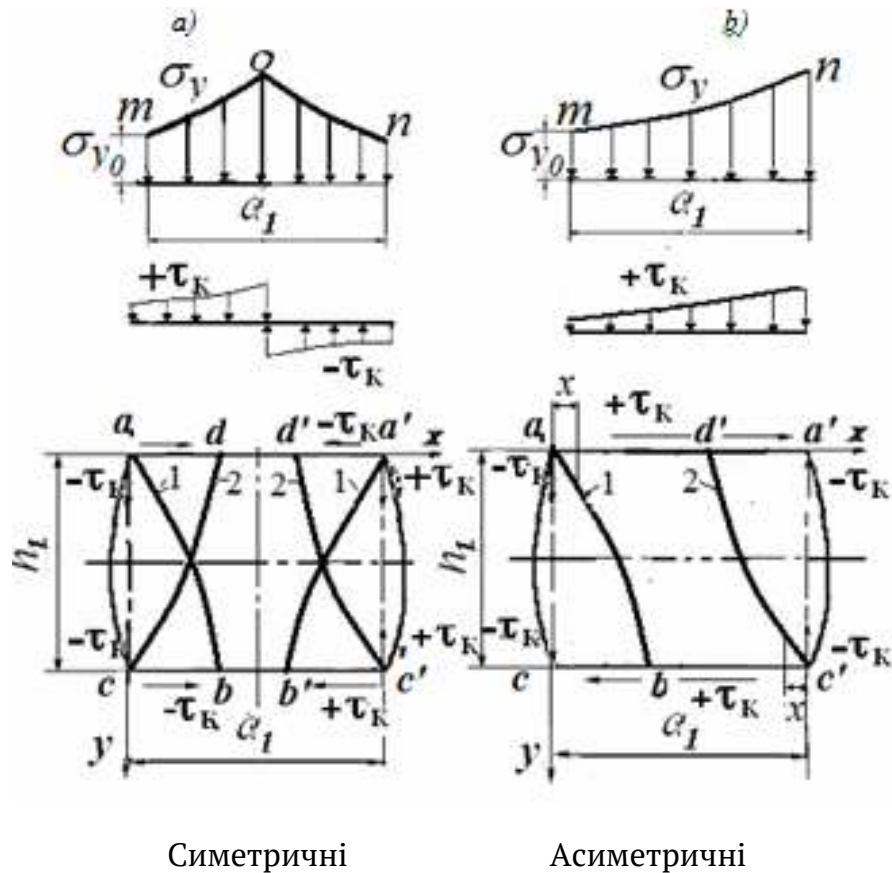


Рисунок 2 – Схеми ТМЕДН при двох видах розподілу дотичних напружень (1-ТМЕДН ξ , 2-ТМЕДН η)

На рис. 2 можна побачити, що частина зразка, що виходить з-під навантаження в процесі розвитку тріщин при асиметричному навантаженні, дорівнює $2x$, а частина, що несе, - дорівнює $(a_1 - 2x)$. Тоді питоме зусилля згідно зі схемою (рис. 2, б) з урахуванням виходу частини зразка з-під навантаження на величину $2x$ на підставі формули визначається як

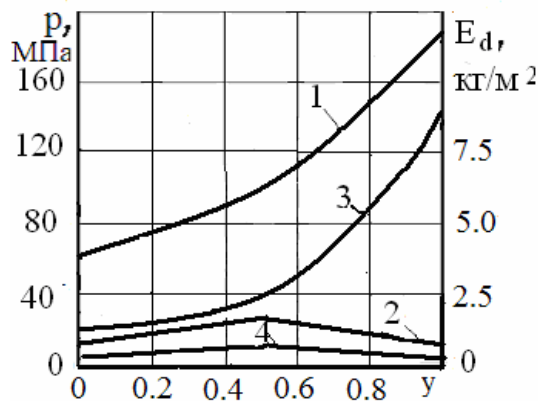
$$p = \frac{\sigma_{y\xi}}{a_1 - 2x_\xi} \int_0^t \left(1 + \frac{f_k \cdot t}{h_1} \right) dt = \frac{gh\sigma_{y\xi}}{f_k(a_1 - 2x_\xi)} \left(\exp\left(\frac{f_k(a_1 - 2x_\xi)}{gh_1} \right) - 1 \right),$$

де $t = a_1 - 2x$.

На підставі отриманого виразу при асиметричному контактному навантаженні розроблено метод розрахунку параметрів діаграм «питоме зусилля – ордината», «напруження – деформація» та енергетичної оцінки процесу руйнування.

Питоме зусилля при симетричних контактних дотичних напруженнях постійно зростає з розвитком тріщин (рис. 3, крива 1), а при асиметричних

спрямованих контактних дотичних напруженнях зростає від ординати вершини тріщини до горизонтальної осі симетрії, потім знижується (рис.3, крива 2) при цьому максимальне значення питомого зусилля в першому випадку в залежності від показників фізико-механічних властивостей матеріалу в 9-10 разів вище, ніж у другому випадку, при асиметричному розподілі.



$$K_n = 10 \text{ МПа}; \rho = 45^\circ$$

Рисунок 3 – Залежність питомого зусилля для зразка при симетричному (1), при асиметричному (2) розподілі і відповідно питомої енергії руйнування (3,4) від ординати вершини тріщини

Для розрахунку питомої енергії руйнування при симетричному та асиметричному розподілі контактних дотичних напружень скористаємося відомою формулою, що враховує витрати енергії при косому зсуві,

$$E_d = \frac{1}{2E} \left(p^2 + \sigma_x^2 - 2\nu p \sigma_x + 2(1 + \nu) \cdot \left(f_k p \left(1 - \frac{2y}{h} \right) \right)^2 \right).$$

Зазначимо, що четвертий член у дужках формули відноситься до асиметричного навантаження. Принагідно слід підкреслити, що розрахунок за цією формулою свідчить про виникнення стискаючих горизонтальних напружень при симетричному навантаженні, а при асиметричному навантаженні - розтягуючих горизонтальних напружень. Умови асиметрично спрямованих контактних дотичних напружень при дробленні крихких тіл є вигіднішими з точки зору витрат енергії на руйнування в порівнянні з симетричними контактними дотичними напруженнями. Питома енергія руйнування при симетричному навантаженні постійно зростає (рис.3, крива 3), а при асиметричному навантаженні при розвитку тріщини до горизонтальної

лінії симетрії зразка зростає, та потім знижується (рис. 3, крива 4). Загалом асиметричне навантаження зразка теоретично забезпечує зниження питомої енергії руйнування в 40 - 45 разів. Скажімо, цей результат може у читачів викликати недовіру. Але розроблений метод для симетричних дотичних напружень перевірений на всіх відомих шести формах руйнування за досить високої збіжності розрахункових та експериментальних даних. При використанні методу змінено єдиний знак контактного тертя.

Умови навантаження шматків порід асиметричними спрямованими контактними дотичними напруженнями є вигідними з точки зору витрат енергії руйнування при дробленні крихких тіл порівняно з симетричними контактними напруженнями. Ці умови, на наш погляд, частково реалізовані в жоренах та окремих типах дробарок. На думку авторів, слід активізувати дослідження з більш глибокого теоретичного та експериментального вивчення явища малоенергоємного руйнування крихких тіл при асиметричному навантаженні для створення найефективніших технічних засобів їх подрібнення.

Висноки. Проведений аналіз існуючих класичних теорій визначення кількості енергії, необхідної для дезінтеграції твердого матеріалу показав, що використовувати на практиці їх дуже не просто. Кожна з них реалізує тільки невелику частку спектру умов дроблення та подрібнення твердих тіл. В той же час вони практично не враховують контактне тертя між інструментом та породою.

Авторами запропоновано використовувати нову теорію локального руйнування гірської породи при симетричному і асиметричному розподілу контактних дотичних напружень, яка дозволяє керувати процесом руйнування при найменших витрат енергії та наведена методика визначення необхідної кількості енергії руйнування. Доведено, що асиметричне навантаження зразка теоретично забезпечує зниження питомої енергії руйнування в 40 - 45 разів.

На думку авторів завдання подальших досліджень полягає в удосконаленні схем деформування гірської породи в дробарках та млинах та в пошуку шляхів підвищенні ефективності та коефіцієнта корисної дії та енерговитрат.

ЛІТЕРАТУРА

1. С.Е. Андреев, В.А. Перов, В.В. Зверевич Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. 3-е изд., перераб. и доп.- М.: Недра, 1980.-415с.
2. В.С. Блохин, В.И. Большаков, Н.Г. Малич. Основные параметры технологических машин. Машины для дезинтеграции твердых материалов: Учебное пособие ч.1 – Днепропетровск; ИМА - пресс. 2006. - 404с.
3. Л.А. Вайсберг, Л.П. Зарогатский, В.Я. Туркин Вибрационные дробилки. Основы расчета, проектирования и технологического применения. -СПб.:Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. – 306с.
4. М. Маліч, Л. Васильєв, Д. Васильєв Оцінка енергії руйнування зразків гірських порід при асиметричному навантаженні // Укаїнський гірничий ф-2021. Матеріали міжнародної конференції – Дніпро.- Д.: Національний технічний університет «Дн. Політ», 2021. –С. 132-139 .

REFERENCES

1. S.E. Andreev, V.A. Perov, V.V. Zverevych Droblenye, yzmelchenye y hrokhocheniye poleznikh yskopaemikh. 3-e yzdz., pererab. y dop.- M.: Nedra, 1980.-415s.
2. V.S. Blokhyn, V.Y. Bolshakov, N.H. Malych. Osnovnie parametri tekhnolohycheskykh mashyn. Mashyni dlia dezyntehratsyy tverdikh materyalov: Uchebnoe posoby ch.1 – Dnepropetrovsk; YMA - press. 2006. - 404s.
3. L.A. Vaisberh, L.P. Zarohatskyi, V..Ia. Turkyn Vybratsyonnie drobylky. Osnovy rascheta, proektyrovanyia y tekhnolohycheskoho prymerenyia. -SPb.:Yzd-vo VSEHEY, 2004. – 306s.
4. M. Malich, L. Vasyliiev, D. Vasyliiev Otsinka enerhii ruinuivannia zrazkiv hirskykh porid pry asymerychnomu navantazheni // Ukainskyi hirnychiy f-2021. Materialy mizhnarodnoi konferentsii – Dnipro.- D.: Natsionalnyi tekhnichniy universytet «Dn. Polit», 2021. –S. 132-139 .

Received 26.04.2022.

Accepted 29.04.2022.

On the question of determining the quantity of energy necessary for the disintegration of rocks to a certain size

Abstract. An analysis of the existing classical theories of determining the amount of energy required for the disintegration of solid bodies is carried out. The classical energy hypotheses of the destruction of Rittinger, Kick-Kirpychev and Bond can be combined by the formula of the so-called generalizing hypothesis $dE^1 = -k \frac{dx}{x^{f(x)}}$, where E^1 is the specific energy transmitted per unit volume of the body, which is collapsing. It is necessary to increase the energy of the newly created surface; k - proportionality factor; x - average grain diameter; $f(x)$ is an exponent that depends on the size of the particles. The geometric interpretation of the generalizing hypothesis and theoretical and empirical

equations of Rittinger, Kick, Kirpychov, Bond, Svensson, Holmes and other authors is shown and it is argued that they complement each other for different degrees of fragmentation. The thermodynamic theory of L. Jingejian and the theory of A. Andreazen are also analyzed.

It was concluded that the presented crushing hypotheses are valid for simplified models of destruction based on the geometric similarity of the particles that are destroyed and the products of destruction and their physical identity, in the absence of defects in the structure of bodies, therefore the need to create a generalized and reliable mathematical model that reveals the main regularities of these processes taking into account the share of internal and especially external friction.

The authors, under the guidance of Professor Vasiliev L.M. a new theory of local destruction of rock with symmetric and asymmetric distribution of contact tangential stresses has been developed, which theoretically provides a reduction in the specific energy of destruction by 40-45 times, which makes it possible to search for new ways of controlling the disintegration process with the lowest energy consumption.

Маліч Микола Григорович - к.т.н., доцент, Український державний університет науки і технологій, Україна, кафедра Колісних та гусеничних транспортних засобів.

Кресс Денис Володимирович – інженер, Підприємство «ТЕРА».

Різо Захар Миколайович - аспірант, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова.

Malich Mykola Grigorovich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ukrainian State University of Science and Technology, Ukraine, Department of Wheeled and Tracked Vehicles.

Kress Denis Volodymyrovych – engineer, "TERA" enterprise.

Rizo Zakhar Mikolayovich - postgraduate student, Institute of Geotechnical Mechanics named after M.S. Polyakova.