

УДК 622.83+539.4

Маліч М.Г.

Енергетичний аналіз дроблення рудних матеріалів асиметричним навантаженням

Malich M.G.

Energy analysis of crushing of ore materials by asymmetric load

Мета. Зниження енерговитрат і підвищення ефективності дезінтеграції рудної маси шляхом управління її напружено-деформованим станом у дробарках на основі математичного моделювання та використання встановлених закономірностей напружень та деформацій у гірській породі при взаємодії з робочим інструментом.

Методика. Використано комплексний метод узагальнення закономірностей теорії пружності та пластичності, закономірностей розподілу контактних нормальних та дотичних напружень, рівняння граничного стану матеріалів, заснованих на критерії міцності Кулона; теорії ліній ковзання; зіставлення теоретичних результатів з експериментальними діаграмами «нормальне напруження-подовжня деформація» зразків; факти та явища руйнування гірських порід; узагальнення теоретичних закономірностей, що виникають при силовому контакті інструменту з породою в дробарках.

Наукова новизна. При асиметричних контактних дотичних напруженнях в твердому тілі, що деформується, формуються розтягуючі горизонтальні напруження, при цьому чисельні значення цих напружень зі збільшенням коефіцієнта контактного тертя зростають, а межа міцності на стиснення і питома енергія руйнування гірської породи суттєво знижується.

Результати. Асиметричне навантаження породи потрібно і можна створювати в щокочових дробарках зі складним рухом щоків, в конусних дробарках, у валкових дробарках з різною швидкістю обертання валків. Це відповідає моделі найбільш ефективного ковзного стиснення.

Практична значущість. Створення асиметричних умов навантаження з використанням сил контактного тертя з врахуванням фрикційних та міцнісних характеристик матеріалу, що руйнується, дозволять суттєво знижувати енергоспоживання при дезінтеграції рудної сировини.

Ключові слова Рудні матеріали, дезінтеграція, асиметричне навантаження, дробарки, енергія руйнування.

Purpose. Reducing energy consumption and increasing the efficiency of the disintegration of the ore mass by managing its stress-strain state in crushers based on mathematical modeling and the use of established patterns of stress and deformation in the rock when interacting with the working tool.

Methodology. A complex method of generalization of the laws of the theory of elasticity and plasticity, the laws of the distribution of contact normal and tangential stresses, the equation of the limit state of materials based on the Coulomb strength criterion is used; theories of slip lines; comparison of theoretical results with experimental diagrams of "normal stress-longitudinal strain" of samples; facts and phenomena of rock destruction; generalization of theoretical regularities that arise during the force contact of the tool with the rock in crushers.

Findings. Asymmetric loading of the rock is necessary and can be created in jaw crushers with a complex movement of the jaw, in cone crushers, in roller crushers with different speeds of rotation of the rollers. This corresponds to the model of the most effective sliding compression.

Originality. With asymmetric contact tangential stresses in a deforming solid body, tensile horizontal stresses are formed, while the numerical values of these stresses increase with an increase in the coefficient of contact friction, and the compressive strength limit and the specific energy of destruction of the rock significantly decrease.

Practical value. Creation of asymmetric load conditions using contact friction forces, taking into account the frictional and strength characteristics of the collapsing material, will allow to significantly reduce energy consumption during the disintegration of ore raw materials.

Key words. Ore materials, disintegration, asymmetric load, crushers, energy of destruction.

Вступ. Динаміка зміни якості руд, що видобувають, кольорових і чорних металів, вугілля, гірничо-хімічної сировини та інших твердих корисних копалин тільки за останні двадцять п'ять років показує, що вміст корисних компонентів в них різко знизився. Відомо, що збагачення проводиться шляхом поділу мінеральних асоціацій, які мають певні технологічні властивості за мінеральним складом.

Існуючі масові технології дезінтеграції мають низьку ефективність (насамперед енергетичну): навіть найбільш досконалі з них «використовують» на корисну роботу менше 1% енергії, що підводиться. І це при тому, що витрати енергії на дроблення та подрібнення гірських порід, вже сьогодні становлять десятку частину всієї виробленої в країні електроенергії, продовжують зростати [1].

Якщо врахувати, що крім переробки мінеральної сировини процеси руйнування твердих матері-

алів широко застосовуються в будівельному, целюлозно-паперовому виробництві, для підготовки деревини, у харчовій промисловості, виробництві медичних препаратів, при переробці побутових та промислових відходів та в інших галузях, то можна зробити висновок, що вони є одними з наймасовіших і водночас енерго-, метало-, капітало- та трудомістких технологічних процесів. Поряд з цим існуючі технології дезінтеграції не задовольняють низькі вимоги промислового виробництва [2,3].

По-перше, традиційні процеси руйнування відрізняються низькою селективністю. Це виявляється у тому, що при поділі багатокомпонентних матеріалів доводиться порушувати цілісність самих компонентів, що шкідливо позначається з їх технічних і технологічних властивостях [4,5].

По-друге, для деяких технологій, зокрема при збагаченні корисних копалин та при підготовці гірничо-металургійної та хімічної сировини, облад-

Маліч М.Г.

нання для дезінтеграції, яке серійно випускається, вже не забезпечує отримання необхідної ефективності дезінтеграції [5,6].

У зв'язку з цим виникає потреба в управлінні процесами дезінтеграції і ключем до цього є оцінка несучої здатності гірської породи за різних видів впливу робочих органів дробарок різних типів.

Аналіз літературних даних. Дослідники [7,8,9] для оцінки несучої здатності породи використовують діаграми «нормальне напруження – поздовжня деформація», які будують на спеціальних пресах підвищеної жорсткості при одновісному та об'ємному стисканні зразків. Однак використання в практичних розрахунках межі міцності та залишкової міцності руйнування зразків, отриманих на підставі цих діаграм, є величинами відносними через вплив масштабного ефекту, який спостерігається не тільки на тріщинуватих, але і на зразках без тріщин і залежать від їх розмірів. Крім того, виявлено, що при асиметричному розподілі контактних дотичних напружень руйнування твердого матеріалу іде з значно меншими витратами енергії [10], ніж при одновісному стисканні [11,12], а це свідчить про необхідність більш детального аналізу щодо процесів руйнування різних матеріалів в різних умовах навантаження.

Внаслідок викладеного слідє висновок, що ще не повною мірою розкрито механізм зародження тріщини та подальшого руйнування тіла, яке деформується [13]. При цьому не завжди враховується внутрішнє та контактне тертя [14], недостатньо відпрацьовані аналітичні методи розрахунку та побудови діаграм «нормальне напруження – поздовжня деформація» з використанням доступних для експериментального визначення показників властивостей гірських порід, що дозволяють визначати напружено-деформований стан шматків породи при впливі на них робочого органу [15] для пошуку шляхів найефективнішого руйнування.

Мета і завдання досліджень. Розробка математичних моделей деформування тіл при взаємодії нормального і тангенційного навантаження від

робочого інструменту на породу, виникнення перших тріщин, їх розвитку у твердому тілі для управління їх напружено-деформованим станом у процесах дезінтеграції для руйнування рудних матеріалів є актуальною науковою проблемою, що має важливе практичне значення для гірничо-металургійного комплексу країни.

Основна частина. Для дослідження зобразимо схематично розвиток тріщин, які формуються за траєкторіями максимальних ефективних дотичних напружень (ТМЕДН) при симетричному та асиметричному навантаженні (рис. 1).

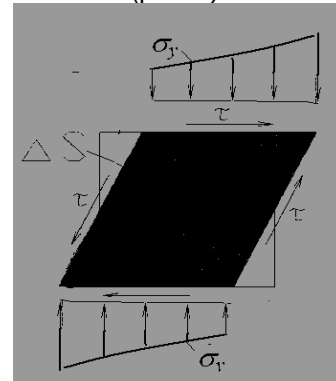
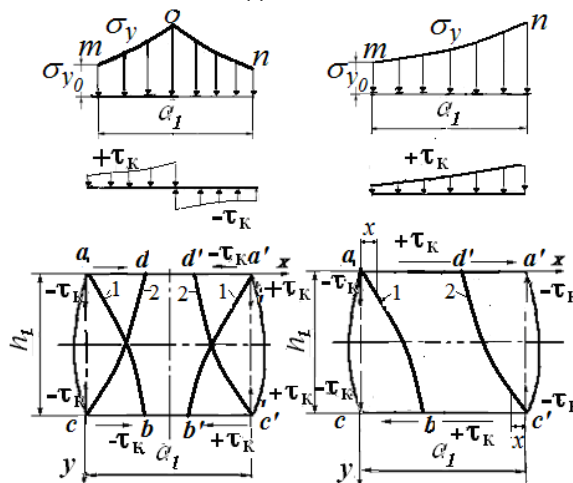


Рисунок 1 – Схема формування асиметричних дотичних напружень від контактної тертя

Схема вертикального нормального напруження при симетричному та асиметричному розподілі дотичних напружень наведена на рис. 2.

Візьмемо одну з шести відомих найпростішу форму руйнування призматичних зразків гірських порід – усічено-клинову, та по методиці [12] збудуємо криві: «питоме зусилля – ордината» усічено-клинової форми руйнування зразків при $k_n = 10$ МПа; $\rho = 45^\circ$; $f_k = 0,3$ при симетричному розподілі контактних дотичних напружень, коли дотичні напруження на верхній поверхні мають знак плюс, на нижній - знак мінус (рис.3, крива 1).

a) b)



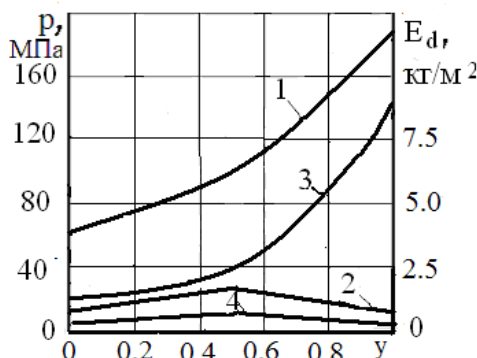
1 – ТМЕДН ξ 2 – ТМЕДН η

a) – симетричні
дотичні напруження

b) – асиметричні
дотичні напруження

Рисунок 2 – Схеми ТМЕДН при двох видах розподілу дотичних напружень

При асиметрично спрямованих контактних дотичних напруженнях маємо позитивні знаки на контактних поверхнях при розвитку тріщин зверху вниз ТМЕДН ξ і негативні знаки - знизу вгору по ТМЕДН η (рис.2,b).



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

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

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

де $t = a_1 - 2x$.

На підставі отриманого виразу є можливість при асиметричному контактному навантаженні розробити метод розрахунку параметрів діаграм «питоме зусилля – ордината тріщини», «напруження – деформація» та енергетичної оцінки процесу руйнування. Визначимо напруження у вершині тріщини σ_{y_ξ} . Для розрахунку напруження у

Для побудови діаграми «питоме зусилля – ордината» при асиметричних напрямках контактних дотичних напружень необхідно підкоригувати викладений спосіб. Потрібно визначити питоме зусилля p на майданчику зразка, що не вийшов з-під навантаження. Формула розподілу контактних нормальних напружень у цьому випадку має наступний вигляд

$$\sigma_{y_i} = \sigma_{y_\xi} \cdot e^{\frac{f_k \cdot x}{g \cdot h_1}}. \quad (1)$$

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,b) з урахуванням виходу частини зразка з-під навантаження на величину $2x$ на підставі формули визначається як

вершині тріщини при асиметричних напрямках контактних дотичних напружень необхідно до формул Васильєва Д.Л. [16] внести зміни в знаках складових. Отже, напруження у вершині тріщини на ТМЕДН ξ при асиметричних дотичних напруженнях визначаються системою рівнянь

$$\sigma_{y_\xi} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{k_n(1 + \mu d) \left(1 + \sin \rho \sqrt{1 - b_\xi^2}\right) \cdot \exp(2\mu(\beta_\xi + \beta_b))}{1 - \sin \rho \sqrt{1 - b_b^2}} - k_b \right) \quad (3)$$

де

$$k_b = \frac{(k_n + \mu \sigma_{y_\xi}) \left(1 - \sin \rho \sqrt{1 - b_\xi^2}\right)}{(1 + \mu d) \left(1 + \sin \rho \sqrt{1 - b_b^2}\right) \exp(-4\mu\beta_b)} \quad (4)$$

$$b_\xi = \frac{f_k \left(1 - \frac{2y}{h_1}\right) \cdot \sigma_{y_\xi} \cdot \exp\left(\frac{f_k \cdot x_\xi}{gh_1}\right)}{k_n + \mu \sigma_{y_\xi} \cdot \exp\left(\frac{f_k \cdot x_\xi}{gh_1}\right)}, \quad (5)$$

де при $y > 0.5 h$ $f_k = -f_k$.

$$b_b = \frac{f_k \cdot \sigma_{y_\xi} \cdot \exp\left(\frac{2f_k \cdot x_b}{gh}\right)}{k_b + \mu \sigma_{y_\xi} \cdot \exp\left(\frac{2f_k \cdot x_b}{gh}\right)}, \quad (6)$$

$$\beta_\xi = \frac{1}{2} \arctg \frac{f_k \sigma_{y_\xi} \left(1 - \frac{2y}{h_1}\right) \exp\left(\frac{f_k \cdot x_\xi}{gh_1}\right) \cos \rho}{\left(k_n + \mu \sigma_{y_\xi} \exp\left(\frac{f_k \cdot x_\xi}{gh_1}\right)\right) \left(\sin \rho - \sqrt{1 - b_\xi^2}\right)}; \quad (7)$$

$$b_b = \frac{f_k \sigma_{y_b} \exp\left(\frac{f_k \cdot x_b}{gh_1}\right)}{k_b + \mu \sigma_{y_b} \exp\left(\frac{f_k \cdot x_b}{gh_1}\right)}; \quad (8)$$

$$\beta_b = \frac{1}{2} \arctg \frac{f_k \sigma_{y_b} \exp\left(\frac{f_k \cdot x_b}{gh}\right) \cdot \cos \rho}{\left(k_b + \mu \sigma_{y_b} \exp\left(\frac{f_k \cdot x_b}{gh}\right)\right) \left(\sin \rho - \sqrt{1 - b_b^2}\right)}; \quad (9) \quad \alpha_\xi = \frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2} + \beta_\xi;$$

(10)

$$\alpha_\eta = \frac{5\pi}{4} + \frac{\rho}{2} - \beta_\eta \quad (11)$$

В експоненті виразу (3) параметри β_ξ і β_b зрештою мають абсолютні негативні знаки і істотно знижують значення напруження у вершині тріщини. Питоме зусилля при симетричних контактних дотичних напруженнях постійно зростає з розвитком тріщин (рис. 3, крива 1), а при асиметрично спрямованих контактних дотичних напруженнях зростає від ординати вершини тріщини до горизонтальної осі симетрії, потім знижується (рис. 3, крива 2) при цьому

$$E_d = \frac{1}{2E} \left(p^2 + \sigma_x^2 - 2\nu p \sigma_x + 2(1 + \nu) \cdot \left(f_k p \left(1 - \frac{2y}{h} \right) \right)^2 \right). \quad (12)$$

Зазначимо, що четвертий член у дужках формули відноситься до асиметричного навантаження, тому 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 [17] при дробленні крихких тіл є значно 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 зростає, та потім знижується (рис.3, крива 4).

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

Загалом асиметричне навантаження зразка теоретично забезпечує зниження питомої енергії руйнування в 40 - 45 разів. Скажімо, цей результат може 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 у формулах. Умови навантаження шматків порід асиметричними спрямованими контактними дотичними напруженнями є вигідними з точки зору витрат енергії руйнування при дробленні крихких тіл. Ці умови, частково реалізовані в жоренах та окремих типах дробарок. Тому, 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.

На рис. 4 наведені залежності вертикальних стискаючих (межі міцності), горизонтальних розтягуючих напружень і питомої енергії руйнування зразка при асиметричних контактних дотичних напруженнях від коефіцієнта контактного тертя. Тут важливо відзначити, що при асиметричних контактних дотичних напруженнях формуються горизонтальні розтягуючі напруження, при цьому чисельні значення цих напружень зі збільшенням коефіцієнта контактного тертя зростають, а межа міцності на стиск і питома енергія руйнування знижуються.

На рис. 5 наведено діаграму «напруження – деформація» (1,2,3 при $f_k = 0,3$ і 4,5,6 при $f_k = 0,6$) та «питома енергія – деформація», за якими можна стверджувати, що зі збільшенням контактного тертя при асиметричному розподілі контактних дотичних напружень різко знижуються межа міцності та питома енергія руйнування

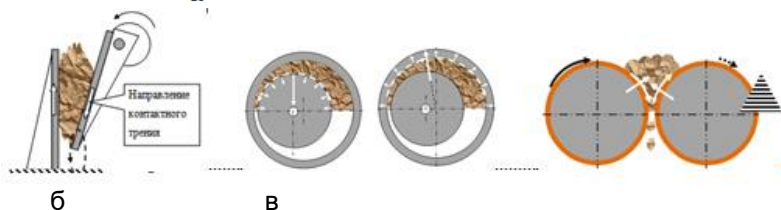
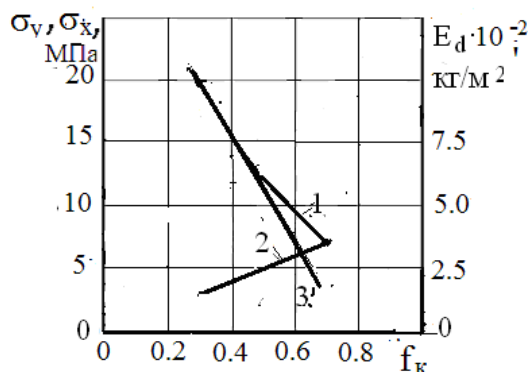


Рисунок 6 – Схеми напрямку сил тертя в дробарках

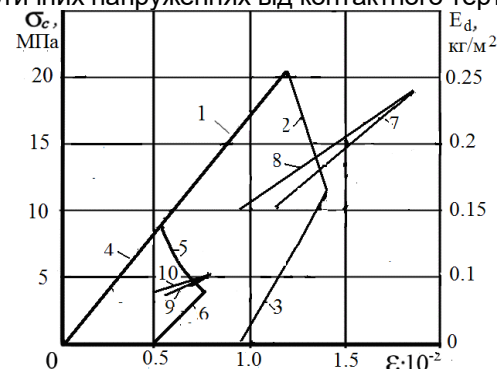
а) – в щоговій зі складним рухом щого; б) – в конусній; в) – в валковій.

В щогових дробарках головною різницею процесів дроблення при складному та простому русі щого є різна орієнтація сил тертя. На контакті дробимої маси з щогоми при простому русі вони направлені в один бік, а при складному – в різні боки. Тому при простому русі щого подрібнювана маса знаходиться в умовах одноосового стискання, а при складному – в умовах ковзного стиску.

Конусну дробарку можна розглядати як результат розвитку щогової дробарки, пов'язаний з переходом від плоского до просторового руху робочого органу. У горизонтальній площині конус, що дробить, здійснює колові рухи всередині нерухомого конусного корпусу, послідовно наближаючись до кожної його точки.

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

Рисунок 4 – Залежності вертикальних стискаючих (межі міцності) (1), гори-зонтальних розтягуючих (2) напружень та питомої енергії руйнування зразка при асиметричних контактних дотичних напруженнях від контактного тертя



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

Рисунок 5 – Діаграми «напруження – деформація» (1,2,3 при $f_k = 0,3$ та 4,5,6 при $f_k = 0,6$) і «питома енергія – деформація» (7,8 при $f_k = 0,3$ та 9,10 при $f_k = 0,6$)

Результати дослідження. При формуванні асиметричних контактних дотичних напружень в деформованому зразку гірської породи формуються розтягуючі горизонтальні нормальні напруження, при цьому чисельні значення цих напружень зі збільшенням контактних дотичних напружень зростають, а межа міцності на стискання і питома енергія знижуються.

Розглянемо особливості дезінтеграції в дробарках [15], (рис.6).

У конусній дробарці сили тертя у вертикальній площині виникають на контакті породи з зовнішнім і з внутрішнім конусом. Вони орієнтовані так само, як і в щоговій дробарці з простим рухом щого. У горизонтальній площині сумарна проекція сил тертя на контакті з рудою по дузі кола конуса дорівнює 0. Конус, який вільно обертається навколо своєї осі, не може сприйняти моменту від сил тертя по дузі контакту з рудою. Тому сили тертя на контакті з конусом розподіляються так само, як під плитою плоского преса – в різні боки. А ось сумарна проекція сил тертя на контакті з рудою по дузі кола нерухомого конусного корпусу не дорівнює 0. Таким чином, як і в щоговій дробарці зі складним рухом щого, обертання конуса, що дробить, за-

безпечує дроблення в ефективному режимі ковзного стиснення.

Підвищення ефективності руйнування у двовалкової дробарці здійснюється за рахунок переходу від звичайного до ковзного стиску за рахунок вибору різної швидкості обертання валків (рис. 8,в), як пропонується, наприклад, Артемівським машинобудівним заводом. За даними [15] дробарки з різною (на 14 - 20%) швидкістю обертання валків застосовуються в азбестовій промисловості.

Обговорення результатів. Створення більш ефективного режиму використання фрикційних характеристик забезпечує більш низьку енергоємність дроблення [18]. Краща енергоємність, поряд з іншими перевагами технологічного та експлуатаційного характеру, основна з яких – можливість роботи під завалом призвела до майже повного витіснення конусними щоковими дробарками у залізничній промисловості. Щокові дробарки продовжують застосовуватися у промисловості будівельних матеріалів, наприклад, при дробленні шматків бетонних конструкцій.

Висновок. В результаті розробки математичних моделей та аналізу напруженості зони взаємодії елементів дробарки зі шматком міцної породи руйнується, встановлено:

1. При контакті породи та інструменту відзначається дві найбільш напружені зони: поверхня контакту, де діють максимальні головні напруги та зона максимальних дотичних напружень під поверхнею контакту на глибині меншій, ніж розміри контактної майданчика. На межі зони контакту виникає практично чисте зрушення, поступово накопичуються граничні деформації у матеріалі, які призводять до початкового розвитку тріщин.

2. Деформації, що виникають у процесі впливу інструменту призводять до зміни форми поверхні навіть при високій твердості матеріалу і фактичні розміри контактних майданчиків збільшуються. Зі збільшенням дотичного навантаження зменшується зона всебічного стиснення матеріалу, глибина найбільш напруженої точки наближається до поверхні контакту. Має місце значна зона дії розтягуючих і дотичних напружень, які є вирішальним чинником при зародженні тріщини.

3. У міру розвитку тріщин ділове зусилля при симетричних контактних дотичних напругах весь час зростає, при асиметричних спрямованих контактних дотичних напружень збільшується від ординати вершини тріщини до горизонтальної осі симетрії, потім знижується, при цьому максимальне значення питомого зусилля в першому випадку в 1 разів вище, ніж у другому випадку.

3. Питома енергія руйнування (з прикладу зразка) при асиметрично спрямованих контактних дотичних напругах проти симетричним навантаженням знижується до 50 - 60 раз.

4. Умови асиметрично спрямованих контактних дотичних напружень при дробленні крихких тіл є більш вигідними з точки зору витрат енергії на руйнування порівняно з симетричними контактними дотичними напругами.

5. Наведені приклади використання сил контактного тертя для створення так званого ковзного стиснення в дробарках підтверджують ефективність руйнування крихких тіл асиметрично спрямованими контактними дотичними напругами і показує шлях зниження енергоємності дезінтеграції при створенні відповідних машин.

Список літератури

1. Большаков В.І., Маліч М.Г., Блохін В.С. Дробильно – сортувальні установки // Фундаментальні і прикладні проблеми гірничої металургії. Сб. наук. праць. Вип.15.-Дніпропетровськ: Ін-т чорної металургії, 2007. (Російською).
2. Назаренко, І. І. Міщук, Є. О. (2019). Дослідження динаміки вібраційної щокової дробарки двосторонньої дії. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, 94, 5-15.
<https://doi.org/10.32347/gbdmm2019.94.0101>
3. В.С. Блохін, В.І. Большаков, М.Г. Маліч. Основні параметри технологічних машин. Машини для дезінтеграції твердих матеріалів: Навчальний посібник ч.1 – Дніпропетровськ; ІМА - прес.- 2006. - 404с. (Російською).
4. Nazarenko, I., Mishchuk, D., Ruchynskyi, M., Rogovskii, I., Mikhailova, L., Titova, L., Berezovyi, M., Shatro, R. Determination of energy characteristics of material destruction in the crushing chamber of the vibration crusher. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(7(112), 41–49.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239292>
5. Самилін В., Білецький В. Спеціальні методи збагачення корисних копалин. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2003. – 116 с.
6. Техніка і технологія збагачення корисних копалин. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 184 «Гірництво» / В. Г. Кравець, В. С. Білецький, В. О. Смирнов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл : 30,6 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 286с.
7. Zhang L. Evaluation of rock strength criteria for wellbore stability analysis / L. Zhang, P. Cao, K.C. Radha // Int J Rock Mech Min Sci. – 2010. – Vol. 47. – Iss. 8. – P. 1304-1316.
8. Mathematical modeling a stochastic variation of rock properties at an excavation design [Sdvyzhkova, O., Babets, D., Moldabayev, S., Rysbekov, K., Sarybayev, M. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEMthis link is disabled](#), 2020, 2020-August(1.2), стр. 165–172

9. Шашенко А.М. Деформованість та міцність масивів гірських порід / А.М. Шашенко, О.О. Сдвижкова, С.М. Ганєєв.-Дніпропетровськ. Національний гірничий університет, 2008, -224с. (Російською).
10. Чанишев А.І. Поза межне деформування матеріалів при антиплоскої деформації та його облік у задачі про розповсюдження прямолінійної напівбескінечної тріщини. Деформування та руйнування матеріалів з дефектами і динамічні явища у гірських породах та виробках. Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського. – Сімферополь. – 2010, С. 349 – 354. (Російською).
11. О.М. Давиденко Механіка ефективного руйнування гірських порід шарошково-ланцюговими долотами / О.М. Давиденко, А.О. Ігнатов // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — К.: ИИМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2019. — Вип. 22. — С. 148-157
12. Васильєв Л.М., Васильєв Д.Л., Маліч М.Г. Самоорганізація форм руйнування зразків гірських порід при їх стисканні: Монографія.- LAP LAMBERT Academic Publishing.-2021- 243с. (Російською).
13. Васильєв Л.М., Васильєв Д.Л., Малич Н.Г., Ангеловский А.А. Механіка створення форм руйнування зразків гірських порід: Монографія.- Дніпро, ІМА-прес.-2018-172с. (Російською).
14. Vasil'ev L.M. Theoretical ground for origination of normal horizontal stresses in rock masses / L.M. Vasil'ev, D.L. Vasil'ev // Journal of Mining Science – 2013– Vol 49, №2 , USA– pp 240-247.
15. М.Г. Маліч, Л.М. Васильєв, О.О. Усов Дослідження впливу параметрів навантаження на розподіл напружень, що діють при руйнуванні шихтових матеріалів в дробарках // Металург. та гірничорудн. пром-сть.-2015.-№7.-С.99-106. (Російською).
16. Васильєв Д.Л. Удосконалення методу розрахунку межі міцності гірських порід при одновісному стисканні / Міжвід. зб. наук. пр. /ІГТМ НАН України.- Дніпропетровськ, 2013.-Вип. 82.-С. 199-206.
17. М. Маліч, Л. Васильєв, Д. Васильєв Оцінка енергії руйнування зразків гірських порід при асиметричному навантаженні // Український гірничий ф-2021. Матеріали міжнародної конференції – Дніпро.- Д.: Національний технічний університет «Дн. Політ», 2021. –С. 132-139 .
18. М.Г. Маліч, Д.В. Кресс, З.М. Різо До питання визначення кількості енергії, необхідної для дезінтеграції гірських порід до певного розміру // Системні технології / Регіональний міжвузівський збірник наукових праць – Дніпро, НМетАУ №4 (141).- Дніпро, 2022. – С 115-130, МНБ: Index Copernicus ISSN –print 1562-9945, ISSN – online 2707-7977, DOI 10.34185/1562-9945-4-141-2022.