

УДК 622.1.2

О. М. Терентьев, д. т. н., проф., **І. М. Стрельцова** асп. (НТУУ «КПІ»)**ЕНЕРГОЄМНІСТЬ ТА ПИТОМА ПОВЕРХНЕВА ЕНЕРГІЯ
РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД МАГНІТНО-ГІДРОКАВІТАЦІЙНИМ
НАВАНТАЖЕННЯМ****O. Terentiev, I. Streltsova** (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)**ENERGY INTENSITY AND SPECIFIC SURFACE ENERGY OF ROCK
BREAKING BY MAGNETIC HYDROCAVITATION STRESSING**

У статті представлено математичну модель енергоємності руйнування гірських порід та представлено зростаючу логарифмічну залежність енергоємності руйнування від питомої поверхневої енергії. Викладені результати експериментальних досліджень зниження останньої магнітно-гідрокавітаційними навантаженнями.

Ключові слова: енергоємність, руйнування, гірські породи, питома поверхнева енергія.

В статье представлено новую математическую модель энергоёмкости разрушения горных пород, также представлена возрастающую логарифмическую зависимость энергоёмкости разрушения от удельной поверхностной энергии. Изложены результаты экспериментальных исследований по снижению последней магнитно-гидрокавитационными нагрузками.

Ключевые слова: энергоёмкость, разрушение, горные породы, удельная поверхностная энергия.

The paper presents a new mathematical model of the energy intensity of rocks and presented increasing energy intensity logarithmic dependence destruction upon specific surface energy. The results of experimental studies last reduction under magnetic hydrocavitation stressing.

Keywords: energy, breaking, rocks, the specific surface energy.

Вступ. Відомі математичні моделі критеріїв руйнування Кулона, Сен-Венана, пізніше Грифітса, Прандтля, Ірвіна, Орвана, Райса, Мора, Треска, Шлейхера, Новацького, Журкова, Шемякіна, Панасюка, Фрідмана [1-8] та інших побудовані на методах механіки суцільних середовищ. Вони ураховують енергетичні та міцнісні параметри руйнування. У більшості з них виділено питому поверхневу енергію, як параметр, що визначає умови розкриття тріщин та руйнування гірських порід (ГП). Тому доцільно, побудувати математичну модель одного з ключових енергетичних параметрів - енергоємності руйнування ГП, яка б ураховувала питому поверхневу енергію. Експериментально доведено, що остання знижується під дією магнітно-гідрокавітаційного навантаження.

Ціль дослідження – зниження енергоємності руйнування ГП за рахунок зменшення питомої поверхневої енергії під дією магнітно-гідрокавітаційного навантаження.

Задача дослідження – побудова математичної моделі енергоємності руйнування ГП в залежності від питомої поверхневої енергії.

Результати досліджень. Дослідження механіки руйнування твердих тіл розпочато у трудах Алана Грифітса (початок ХХ ст.). У його роботі [1] вперше процес руйнування пов'язано не з константами матеріалу, а з довжиною тріщини. Алан Грифітс проводив дослідження для пластини одиничної товщини. Висунув гіпотезу, що тріщина у твердому тілі розвивається під навантаженням за умови, що швидкість вивільнення потенційної енергії деформації більша за приріст питомої поверхневої енергії (ППЕ) тіла:

$$\left| \frac{\partial W}{\partial l} \right| \geq \frac{\partial U}{\partial l}, \quad (1)$$

де W – потенційна енергія деформації пластини, Дж; l – півдовжина тріщини, м; U – питома поверхнева енергія тріщини (для пластини одиничної товщини), Дж/м.

Критична довжина тріщини (критерій руйнування Грифітса) K_{Gr} , м [9-10]:

$$2 \cdot l \geq K_{Gr} = 2 \cdot \gamma \cdot E / \sigma^2, \quad (2)$$

де γ – питома поверхнева енергія, Дж/м²; E – модуль Юнга, Па; σ – напруження розтягу, Па.

З аналізу (1-2) витікає, що основними параметрами, які впливають на процес руйнування ГП є міцнісні характеристики та ППЕ. При руйнуванні потенційна енергія деформації пластин W перетворюється в ППЕ новоутворених частин твердого тіла. Проте, доцільно провести додаткові дослідження по узгодженню розмірностей лівої та правої частини. У праці [11] у критерії Грифітса не враховано вплив пластичної деформації на процес утворення тріщини. Тому, при розрахунку руйнуючих напружень за критерієм Грифітса отримують завищені результати.

Критерій Орована, м [9-10]:

$$2 \cdot l \geq K_{GrO} = 2 \cdot \gamma_{ef} \cdot E / \sigma^2, \quad (3)$$

де γ_{ef} – ефективна ППЕ, яка складається з суми ППЕ γ та енергії пластичних деформацій $\gamma_{пл}$.

Критерій Орована відрізняється від критерію Грифітса наявністю ефективної ППЕ, що дозволяє врахувати пластичні деформації. Це наближає математичну модель (3) до реального процесу. Але є ті ж самі недоліки, що і в (2): розмірності лівої і правої частини не узгоджено.

У роботі [2] Ірвіном запропонований універсальний критерій руйнування, Дж/(м²·√м):

$$K_{Ip} = \sqrt{E \cdot \gamma / (1 - \mu^2)}, \quad (4)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона, в.о.

У (4) на відміну від попередньо вказаних критеріїв додатково враховано відношення пластичних до повздовжніх деформацій, пов'язані коефіцієнт інтенсивності напружень та ППЕ. Проте, розмірність критерію має не скомпенсований метр під коренем. Це вказує на недостатність або надлишок параметрів у правій частині рівняння і потребує додаткових досліджень.

Ірвін сформулював силовий критерій руйнування суть якого полягає в тому, що тріщина отримує можливість руйнування, коли коефіцієнт інтенсивності напружень K досягає критичної величини $K_0 = \text{const}$, Па·м² [3]:

$$K = K_0. \quad (5)$$

Формула (5) відповідає ідеальному пружному руйнуванню. Для урахування довжини пластичної зони вводять поправку Ірвіна в основі якої лежить ідея збільшення довжини тріщини на половину довжини пластичної зони - радіус r , м [3]:

$$r = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \sigma_T^2 / K^2, \quad (6)$$

де σ_T - межа текучості, Па.

Перевагами теорії руйнування Ірвіна (та Орована, так як вони незалежно один від одного прийшли до однакових результатів досліджень) є те, що:

- виконано перехід від ідеального матеріалу в моделі Грифітса до реальних матеріалів;
- ураховано через прийнятий підхід квазікрихкого руйнування, що зона нелінійних ефектів мала в порівнянні з довжиною тріщини;
- визначено радіус пластичної зони навколо верхівки тріщини.

Недоліками є те, що не враховано геометричні розміри масиву та тріщини, можливість їх взаємодії при руйнуванні. Також розмірності лівої та правої частини (6) не співпадають. Радіус пластичної зони виведено з похибкою.

З аналізу представлених вище критеріїв руйнування, зроблено висновок, що ППЕ є одним з ключових параметрів, від якого залежить перебіг процесу руйнування ГП та утворення тріщин.

За дослідженнями [1, 12] мірою опору матеріалу руйнуванню є коефіцієнт поверхневого натягу. Він застосовується до рідин. У механіці руйнування твердого тіла цей коефіцієнт має іншу фізичну інтерпретацію. Це величина, яка є відношенням енергії W на межі матеріалу до одиниці поверхні S при постійній температурі та є ППЕ γ , Дж/м²:

$$\gamma = \frac{W}{S}. \quad (7)$$

У кількісному вигляді γ є роботою, що необхідна для створення одиниці нової поверхні матеріалу, що по суті є виникненням тріщин. Їх утворення і зростання супроводжується формуванням двох берегів. Внаслідок чого на утворення одиниці площі потрібно енергії 2γ . Ця ідея виражена у формулі довжини критичної тріщини, м [5]:

$$l_k = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot \sigma_T^2}, \quad (8)$$

де E – модуль Юнга, МПа; σ_T – теоретична межа міцності, МПа.

Тріщина починає зростати після досягнення теоретичної межі міцності σ_T . Зростання тріщини відбувається з утворенням нових поверхонь, ППЕ яких дорівнює роботі міжатомних сил в об'ємі a^3 (a – параметр кристалічної решітки, м), віднесений до площі a^2 , Дж/м² [4, 12]:

$$\gamma = \frac{\sigma_T^2 \cdot a}{2 \cdot E}. \quad (9)$$

З аналізу (7-9) зроблено висновок, що ППЕ є ключовим чинником у процесі руйнування ГП і пов'язана з розривом міжмолекулярних зв'язків. Це видно з досліджень Морозова, Дж/м² [6]:

$$\gamma = \frac{a \cdot \sigma_T}{2}. \quad (10)$$

На основі (8) побудовано математичну модель енергоємності руйнування, що враховує питому поверхневу енергію та довжину критичної тріщини, Дж/м³:

$$E_p = \frac{l_{kp} \cdot \pi \cdot \sigma_T^2}{2 \cdot \gamma}, \quad (11)$$

де l_{kp} – довжина критичної тріщини, м.

Враховано наявність тріщин в породі через параметр $l_{кр}$. В механіці руйнування довжина тріщини вважається критичною, якщо при її розвитку кількість виділеної пружної енергії більше кількості енергетичних витрат пластичної деформації [13].

Як відомо, зміна питомої поверхневої енергії впливає на руйнування твердого тіла. У відомих дослідженнях ППЕ розглядається як «константа матеріалу». Вчені надають їй різну інтерпретацію. Згідно експериментальних даних [5], ППЕ залежить від оточуючого матеріал середовища і впливає на швидкість поширення тріщини. Ці експериментальні дані спростовують припущення, що ППЕ є «константою матеріалу». Для експериментального дослідження зміни ППЕ обрано магнітно-гідрокавітаційне навантаження, принцип дії якого описаний у [14]. На рисунку 1 представлені залежності зміни ППЕ та енергоємності руйнування від зміни магнітної індукції B , що діє на зразки ГП гнейсу та граніту.

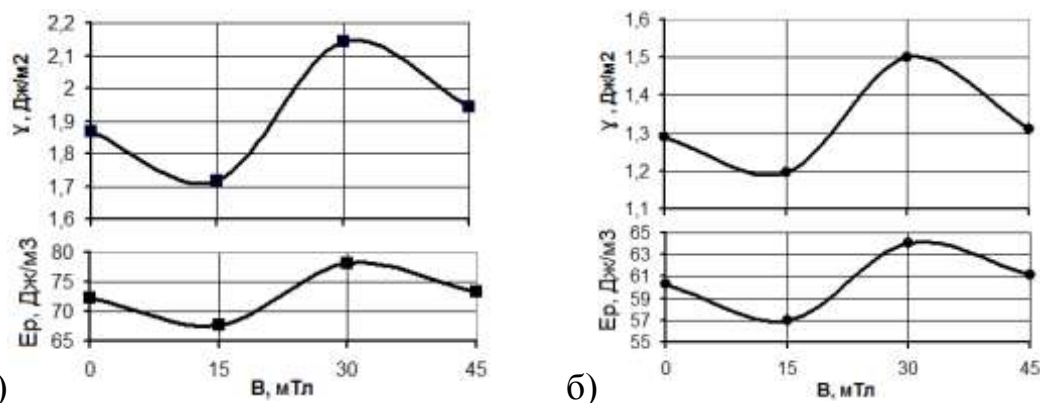


Рис. 1. Залежності питомої поверхневої енергії та енергоемності руйнування від зміни магнітної індукції:

а - граніту; б - гнейсу

Залежності, представлені на рис. 2 мають спадно-зростаючий характер. Це обумовлено явищем магнітопластичного ефекту. Залежності $\gamma=f(B)$ досліджуваних пружно-крихких порід на першій ділянці (0...15) мТл спадають: для гнейсу зі 1.30 до 1.20 Дж/м²; для граніту зі 1.85 до 1.71 Дж/м². Спад γ обумовлений утворенням дефектів та знеміцненням під дією магнітно-гідрокавітаційного навантаження. На ділянці (15...30) мТл спостерігається зростання γ : для гнейсу до 1.50 Дж/м²; для граніту до 2.15 Дж/м². Це обумовлено явищем магнітопластичного ефекту, описаного у роботах [15]. Його суть полягає у впливі слабого електромагнітного поля на пластичність парамагнітних та діамагнітних ГП, до яких відносяться граніт та гнейс. Тобто збільшується їх пластичність. У результаті чого спостерігається ущільнення, та, як наслідок, зростання γ . Після цього процес повторюється подібно до ділянки (0...15) мТл.

У результаті аналізу експериментальних залежностей, представлених на рисунку 1, проведено коригування математичної моделі енергоемності руйнування до феноменологічного вигляду (11) на основі методу регресійного аналізу:

$$E_p = \frac{l_{kp} \cdot \pi \cdot \sigma_T^2}{2 \cdot (-37410 \cdot \ln(\gamma) + 44007)}. \quad (12)$$

На основі (12) побудовано залежності енергоемності руйнування від питомої поверхневої енергії (рис.2).

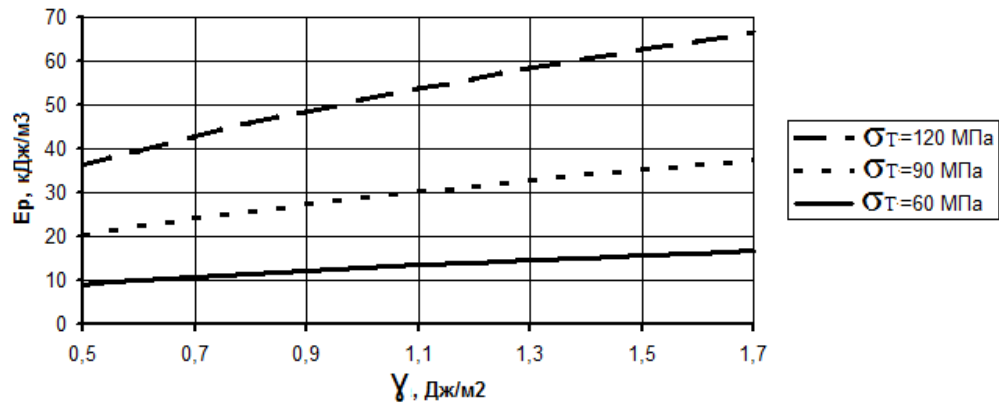


Рис. 2. Залежності енергоємності руйнування від питомої поверхневої енергії

Залежності мають зростаючий логарифмічний характер. Це обумовлено тим, що, у кількісному вигляді ППЕ еквівалентна роботі, утворення одиниці нової поверхні матеріалу [16]. Відповідно, зростання ППЕ, викликає збільшення енергоємності руйнування.

Висновки

1. З аналізу критеріїв руйнування Ірвіна, Орована, Грифітса та інших, визначено, що питома поверхнева енергія є одним з ключових параметрів, від якого залежить процес руйнування гірських порід та утворення тріщин.
2. Створено математичну модель енергоємності руйнування гірських порід, яка відрізняється тим, що ураховує довжину критичної тріщини та питому поверхневу енергію.
3. Визначено, що для гнейсу та граніту при зниженні питомої поверхневої енергії зі 1.30 Дж/м^2 до 1.20 Дж/м^2 та з 1.85 Дж/м^2 до 1.7 Дж/м^2 , енергоємність руйнування спадає з $61 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^3$ до $57 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^3$ та з $73 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^3$ до $68 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^3$, відповідно.

Список використаних джерел

1. Griffith, A. A. The phenomena of rupture and flow in solids [Text]/ A. A. Griffith// Philosophical Transaction of the Royal Society of London. Series A, vol. 221 – 1921. – P. 163-198.
2. Irvin, G. R. Fracture [Текст]/ G. R. Irvin// Springer encyclopedia of physics, vol. 6, 1958.- P. 551-590.
3. Parton, V. Z. Mehanika razrusheniya: Ot teorii k praktike [Text]/ V. Z. Parton. - М.: Nauka, 1990. – 240 с. - ISBN 978-5-382-00157-9.
4. Zhurkov, S. N. O prognozirovanii raazrusheniya gornykh porod [Texst]/ S. N. Zhurkov, V. S. Kuksenko, V. A. Petrov // Izv. AS USSR, seriya Fizika zemli № 6, 1977.- 8 s.

5. Pesticov, V. M. *Mehanika razrusheniya tverdykh tel* [Text]/ V. M. Pesticov, E. M. Morozov. - Sankt-Peterburg: Professiya, 2002. – 300 s. - ISBN: 5-93913-022-4.
6. Morozov, E. M. *Mehanika deformiruemykh tel i konstruktciy* [Text]/ E. M. Morozov // М. : Mashinostroenie – 1975. - 476 s.
7. Irvin, G. *Analysis of Stresses and Straines Near the End of Crack Traversing a plate* [Text]/ G. Irvin// J. Appl. Mech., Vol. 24, № 3 – 1957. - P. 361-364.
8. Obreimow, I. W. *Eine Methode zur Herstellung einkristalliger Metalle* [Text]/ I. W. Obreimow, L. W Schubnikow Z. - Phys., 1924.- 289 p.
9. Vladimirov, V. I. *Phizicheskaya teoriya prochnosti i plastichnosti metallov* [Text]/ V. I. Vladimirov. – М.: LPI, 1975, 206 s.
10. Yakovlev, P. V. *Obosnovanie kriteriya prochnostipri passchetakh zubchatykh peredach* [Text]/ P. V. Yakovlev // Kazanskaia nauka, №4, 2010. - S. 16 - 22. - ISSN 2078-9955.
11. Garipov, T. T. *Modelirovaniye protcessagidrorazryva plasta v porouprugoi srede* [Text]/ T. T. Garipov // Matematicheskoe modelirovaniye, tom 18, №6, 2006. - S. 53-69.
12. Vakulenko, A.A. *O rasprostraneni treshchin v polimerakh* [Text]/ A. A. Vakulenko // *Mehanika elastomerov*, tom 2, vypusk 268, 1978. – S. 5 - 12.
13. Petrov, V. A. *Phizicheskie osnovy promyshlennoi bezopasnosti* [Text]/ V. A. Petrov. - Sankt-Peterburg: Nauka I tekhnika, 2005, №9. - S. 17-19.
14. Terentev, O. *Geometrical and frequency parameters of rotaryhydrocavitation work instrument’s pulse generation* [Text]/ O. Terentev, I. Streltsova// *Theoretical & Applied Science. Materials of the International Scientific Practical Conference 28.02.2014. Shveden, Linkoping.* – P. 54 - 59.
15. Morgunov, R. B. *Magnitoplastichnost I magnitnaia pamiat v diamagnitnykh tverdykh telakh* [Text]/ R. B. Morgunov, A. L. Buchachenko // *ZhETPh*, tom 136, vypusk 3(9), 2009. - S. 505-515.
16. Adamova, L. V. *Protcessy na poverkhnosti razdela faz* [Text]/ L. V. Adamova - Ekaterinburg, Uralskiy gosudarstvennyi universitet im. A. M. Gorkogo, 2007. - 125 s.

Стаття надійшла до редакції 28.09.2015 р.