ISSN 1028-2335 (Print)
Теорія і практика металургії, 2024, № 2
Theory and Practice of Metallurgy, 2024, No. 2

УДК 622.83+539.4

https://doi.org/10.15802/tpm.2.2024.08

Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Ризо З.М., Красовський І.С.

Порівняння достовірності експериментальних методів визначення межі міцності призматичних зразків гірничих порід

Vasyliev L.M., Vasyliev D.L., Rizo Z.M., Krasovskiy I.S.

Comparison of the reliability of experimental methods for determining the strength limit of prismatic samples of mining rocks

Мета. *Розробка математичної моделі для розрахунку параметрів діаграм «напруження – деформація» високих призматичних зразків гірських порід із високим кутом внутрішнього тертя для оцінки їхньої міцності та характеристик руйнування під навантаженням.* ***Методи.*** *Аналітичне моделювання процесу руйнування високих призматичних зразків здійснено з використанням експериментальних значень чотирьох характеристик гірських порід: межі міцності на зсув, коефіцієнтів внутрішнього і контактного тертя, а також модуля пружності. Модель враховує розподіл напружень і розвиток тріщин, характерних для високих зразків.* ***Результати.*** *Запропонований метод дозволяє визначати межу міцності призматичних зразків залежно від їхньої висоти. Виявлено гіперболічну залежність між висотою зразка і його межею міцності, зокрема, подвоєння висоти зразка знижує його міцність приблизно на 30 %. Метод також описує вплив утворення тріщин на контактних поверхнях на деформаційні властивості зразків.* ***Наукова новизна.*** *Вперше розроблено математичну модель, яка описує механізми руйнування високих призматичних зразків гірських порід, враховуючи вплив високого кута внутрішнього тертя. Модель дає аналітичне обґрунтування зниження міцності зразків із ростом їхньої висоти та перерозподілу напружень.* ***Практичне значення.*** *Розроблена модель може бути використана для розрахунку механічних параметрів високих призматичних зразків гірських порід у гірничих підприємствах. Отримані результати сприяють оцінці стійкості гірських порід та оптимізації гірничих робіт, забезпечуючи їхню ефективність та безпеку.*
Ключові слова: *гірська порода; межа міцності; руйнування; тріщина; діаграма "напруга-деформація".*

Purpose. *Development of a mathematical model for calculating the parameters of stress-strain diagrams of tall prismatic rock samples with a high internal friction angle to evaluate their strength and destruction characteristics under load.* ***Methods.*** *Analytical modeling of the destruction process of tall prismatic samples was conducted using experimental values of four rock properties: shear strength limit, internal and contact friction coefficients, and elastic modulus. The model accounts for stress distribution and crack development characteristic of tall samples.* ***Results.*** *The proposed method allows determining the strength limit of prismatic samples depending on their height. A hyperbolic relationship between sample height and strength limit was identified, demonstrating that doubling the sample height reduces its strength by approximately 30%. The method also describes the influence of crack formation on the contact surfaces on the deformation properties of the samples.* ***Scientific novelty.*** *For the first time, a mathematical model has been developed to describe the destruction mechanisms of tall prismatic rock samples, taking into account the influence of a high internal friction angle. The model provides an analytical basis for the reduction in sample strength with increasing height and the redistribution of stresses.* ***Practical significance.*** *The developed model can be used to calculate the mechanical parameters of tall prismatic rock samples in mining enterprises. The obtained results contribute to assessing rock stability and optimizing mining operations, ensuring their efficiency and safety.*
Keywords: *rock; tensile strength; fracture; crack; stress-strain diagram.*

1. Вступ

Механічні властивості гірських порід визначають їх опір руйнуванню в процесі видобутку корисних копалин і проходки гірничих виробок. У колишньому Радянському Союзі випробування зразків регламентувалися ГОСТами [1], які базувалися на стисканні зразків правильної геометричної форми. Метою всіх ГОСТів при механічних випробуваннях металів, гірських порід і інших матеріалів є встановлення показника тимчасового опору стисканню.

Дослідження властивостей матеріалів при стисканні здійснюється шляхом випробувань зразків, виготовлених у формі кубів, призм або циліндрів, висота яких незначно відрізняється від їхніх поперечних розмірів. ГОСТ [1] застосовується досі в країнах колишнього Радянського Союзу, зокрема в Україні. У європейських країнах з метою усунення впливу контактного тертя на значення межі міцності рекомендовано приймати співвідношення висоти зразка до його довжини або діаметра рівним двом (або близьким до цього значення) [2].

У зв'язку з вступом України до Європейського Союзу її фахівцям із механіки гірських порід ще належить розробити нові ГОСТи, наближені до європейських стандартів. Проте поки що неясно, наскільки зазначене співвідношення впливає на зменшення контактного тертя, а отже, і на значення межі міцності зразка.

Автори статті на основі теорії ліній ковзання розробили декілька аналітичних методів розрахунку меж міцності та параметрів діаграм «напруження –

© Васильев Л.М. – д.т.н., проф. ІГТМ
Васильев Д.Л. – с.н.с. ІГТМ
Ризо З.М. - ІГТМ
Красовський І.С. - ІГТМ

© Vasyliev L.M. – d.t.s., proftssor, IGTM
Vasyliev D.L. – IGTM
Rizo Z.M. – IGTM
Krasovskiy I.S. – IGTM

This is an Open Access article under the CC BY 4.0 license https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

деформація» для призматичних зразків із високим ступенем відповідності експериментальним даним, що застосовуються до відомих форм їх руйнування при одноосьовому стисканні за Л. І. Бароном: усічено-клинової, поздовжньої, клинової та діагональної форм – із використанням експоненційного за Є. П. Унксовим [3] розподілу контактних нормальних напружень.

Однією з умов утворення форм руйнування зразків гірських порід є перетин однієї з ліній ковзання вертикальної лінії симетрії зразка, що призводить до утворення клинової форми. Зрозуміло, що зі збільшенням висоти зразка ймовірність переходу усічено-клинової та поздовжньої форм у клинову або діагональну форми зростає.

Крім того, аналітичні розрахункові методи дозволяють визначити межу міцності зразка за відсутності контактного тертя, значення якої можна порівняти з розрахунковим значенням межі міцності зразка висотою, що перевищує вдвічі його поперечний розмір. Як розуміють фахівці з міцності, саме межа міцності гірських порід за відсутності контактного тертя є точною. Однак при випробуванні зразків на стискання неможливо повністю усунути контактне тертя між зразком і плитами.

Експериментатори зауважили, що зі збільшенням висоти зразка його міцність знижується. Проте наскільки це зниження наближає експериментальні дані до точного значення міцності – неясно. У зв'язку з цим ми поставили перед собою мету – розробити аналітичний метод розрахунку меж міцності високих зразків і порівняти їх із такими ж значеннями для зразків правильної геометрії, тобто коли їхня висота дорівнює довжині (ширині).

2.**Методика**.

За зразок конструкції відразу візьмемо клиноподібну форму з фізико-механічними властивостями породи: k_n=10 Мра – міцність на зсув; f_c=0.3 – коефіцієнт контактного тертя; ρ= 39° – кут внутрішнього тертя; E= 5500 Мра – модуль пружності. Клинова форма, на відміну від інших чотирьох форм руйнування, має тріщину, яка при руйнуванні перетинає вертикальну лінію симетрії із примиканням до тріщини відколотого трикутного фрагмента в контактній області.

Зробимо припущення у процесі деформування відбувається викривлення форми тіла. Викривлення форми перерізів всередині зразка гірської породи нехтується. Проте в кутових областях зразка враховується правило парності дотичних напружень, оскільки внаслідок деформування зразок набуває бочкоподібної форми. Процес деформування розглядається у кожний момент часу, щоб отримати результати, що відповідають усьому періоду процесу руйнування.

Центр координат розташовуємо у верхньому лівому куті зразка. Вісь *уу* спрямовується вниз, тобто в напрямку дії активної сили, а вісь *хх* – уздовж контактної площини зліва направо. Сили тертя спрямовуються проти поперечного деформування, тобто від країв зразка до вертикальної площини симетрії зразка.

Згідно з правилом знаків, дотичні напруження від тертя у верхній лівій чверті фігури приймаються додатними, у правій – від'ємними. У нижніх чвертях, відповідно, напруження мають протилежні знаки. Припускаємо, що дотичні напруження від тертя вздовж висоти зразка затухають за лінійним законом. Уздовж горизонтальної лінії симетрії вони мають нульові значення.

За Є. П. Унксовим [3], розподіл нормальних стискаючих напружень уздовж довжини лівої половини зразка описується експоненційними кривими σ_{y_i} по довжині лівої половини зразка описуються експоненційними кривими (рис.1)

$$\sigma_{y_i} = \sigma_{y_0}\, exp\left(\frac{2f_c \cdot x}{h}\right); \qquad (1)$$

$$\tau_к = f_c \cdot exp\left(\frac{2f_c \cdot x}{h}\right) \qquad (2)$$

та межа міцності зразка

$$\sigma = \sigma_{y_0} \frac{h}{f_c \cdot a_1}\left(exp\left(\frac{f_c \cdot a_1}{h}\right) - 1\right), \qquad (3)$$

де σ_{y_0} – нормальна напруга в кутовій точці; a_1 і h – довжина (ширина) та висота зразка відповідно.

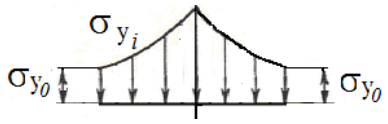
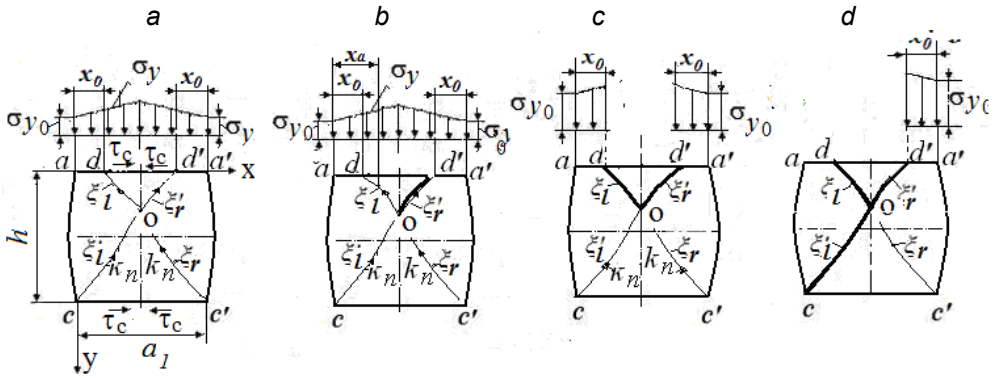


Рисунок 1 – епюри контактних нормальних σ_y напруг за Є.П. Унксову

Спочатку надамо опис методу розрахунку призматичного зразка правильної геометрії, заснованого на теорії ковзання. Згідно з теорією ліній ковзання, тріщини можуть розвиватися зверху вниз і знизу вгору. Розгляд процесу зверху вниз є більш теоретичним. Зрозуміло, що процес розвитку тріщини починається на лінії ковзання (ЛК) у точці, де потрібне найменше напруження для її утворення.

Продовжуючи попереднє дослідження, припустимо, що розподіл контактних нормальних напружень має вигляд, зображений на рисунку, згідно з Є. П. Унксовим [3]. Уявімо, що тріщина утворюється в точці dd на правій лінії ковзання ξ_r, у поєднанні з ЛС ξ_l., ...виходячи з лівого нижнього кута на відкритій поверхні зразка. У процесі руйнування відкритість поверхні відіграє важливу роль. В принципі, завдання може вирішуватися і з початком руйнування в лівій частині зразка. Обидва розв'язки є рівноцінними, проте спостерігаються деякі несуттєві відмінності у знаках параметрів лінії ковзання (ЛК).

Тепер обумовимо умови розвитку тріщин (рис. 2)



a)– на момент передруйнування; *b*) – в момент формування клиноподібної сторони;
c) – в момент формування клина*; d*) – у момент формування клиновидної форми

Рисунок 2. – Схема формування клиноподібної форми призматичного зразка правильної геометрії породи при його стисненні

У процесі розвитку тріщини частина зразка виходить з-під навантаження, що визначається проєкцією поверхні тріщини на горизонтальну площину. Знаючи на кожному етапі координати вершини однієї або двох тріщин, можна визначити несучу частину зразка. Ця частина дорівнює початковій одиничній довжині зразка за вирахуванням тієї частини, яка вийшла з-під навантаження.

Частина одиничної довжини, що вийшла з-під навантаження, легко визначається за геометрією ЛК. Знаючи граничні середні навантаження на несучу частину зразка, можна за законом Гука визначити величину деформації. Оскільки у розглянутому випадку тріщина розвивається за двома різними ЛК ξ_r і ξ_l двох вертикальних половинок зразка справа наліво, розпишемо її умови розвитку та

при x≥ $0.5a_1$

$$p = \sigma_{y_o} \frac{h}{2f_c}\left(\left(exp\left(\frac{f_c a_1}{h}\right)-1\right)+\left(exp\left(\frac{2f_c(x_a-0{,}5a_1+x_o)}{h}\right)-1\right)\right)/(x_a+x_o); \quad (7)$$

при x≤ $0.5a_1$

$$p = \sigma_{y_o} \frac{h}{2f_c}\left(\left(exp\left(\frac{2f_c x_1}{h}\right)-1\right)+\left(exp\left(\frac{2f_c(x_o)}{h}\right)\right)\right)/(x_a+x_o). \quad (8)$$

Тут слід зробити застереження про поздовжньому нормальному навантаженні σ_{y_o} в вершине трещины. Напруження σ_{y_o}з нулем відноситься до цілого зразка. У момент утворення тріщини ми замінюємо нульовий символ на символ відповідного препарату, по якому розвивається тріщина. Як видно з формул (7), (8), спочатку слід визначити величину вертикального нормального напруження σ_y в кутовій точці, а точніше у верхній частині тріщини.

Ясно, що аналітичні методи мають базуватися на критерії міцності, який у найбільшій мірі описує процеси деформування та руйнування гірських порід. Ми базуємося на різновиді класичної, третьої теорії – теорії максимальних ефективних дотичних напружень – теорії, заснованої на критерії закономірності питомих зусиль при абсцисах $x \geq 0.5a_1$ і $x \leq 0.5a_1$ в роздільності. Врахуємо при цьому, що при розвитку правої частини тріщини ліва частина зразка буде під питомим навантаженням

$$p = \int_0^{0.5a_1} \sigma_{y_0} \cdot \phi(x)dx/0.5a_1, \quad (5)$$

а правий – під навантаженням

$$p = \int_{0.}^{0.5a_1} \sigma_{y_0} \cdot \phi(x)dx/(x_a + x_o), \quad (6)$$

де *φ(x)* – Функція нормального збільшення напруги на одній ненапруженій контактній поверхні зразка; $x_a=a_1-x$.

У розподілі напружень по Е. П. Унксову вираз (6) має вигляд:

Ясно, що аналітичні методи мають базуватися на критерії міцності, який у найбільшій мірі описує процеси деформування та руйнування гірських порід. Ми базуємося на різновиді класичної, третьої теорії – теорії максимальних ефективних дотичних напружень – теорії, заснованої на критерії міцності Кулона [3]. Завдяки добрій збіжності цього критерію з експериментальними даними, він широко застосовується в теорії напруженого стану сипучого середовища, ґрунтів і в механіці гірських порід [4–16].

Зазначимо, що вітчизняна [5–11] та зарубіжна література [12–16] поки що не пропонують загальновизнаного критерію міцності. Критерій Кулона для зв'язних середовищ базується на припущенні, що опір породи зсуву τ_α на розглядуваній площині дорівнює сумі опору чистому зсуву k_n,

$$|\tau_\alpha| = k_n + \mu\sigma_\alpha \quad (11)$$

или

$$k_n = |\tau_\alpha| - \mu\sigma_\alpha, \quad (12)$$

де k_n – межа опору зсуву матеріалу; μ– коефіцієнт внутрішнього тертя.

Під цим рівнянням слід розуміти так: збій не відбудеться, якщо ліва частина буде менше правої (12). Критерій (12) обмежує напруги зсуву будь-якого напрямку, тому йдеться про абсолютне значення τ_α. За цим критерієм ми отримали формули для розрахунку вертикальних напружень на вершині тріщини. Остаточні основні формули ми наведемо тут, без висновку. Вони застосовні для кожної з відомих п'яти форм перелому з певними модифікаціями. Формули для визначення величини максимального поздовжнього нормального напруження на вершині тріщини виглядають наступним чином

$$\sigma_y = \frac{1}{\mu}\left[\frac{k_n\left(1+\sin\rho\sqrt{1-b_{\xi'r(l)}{}^2}\right)exp\left(2\mu\left(\beta_{\xi'r(l)}+\beta_{o(c)}\right)\right)}{1-\sin\rho\sqrt{1-b_{o(c)}^2}} - k_{o(c)}\right], \quad (13)$$

де $k_{o(c)} = \frac{(k_n+\mu\sigma_y)\cdot\left(1-\sin\rho\sqrt{1-b^2{}_{o(c)}}\right)}{\left(1+\sin\rho\sqrt{1-b^2_{\xi'r(l)}}\right)\cdot exp\left(2\mu\left(2\beta_{o(c)}\right)\right)}$; (14)

$k_{o(c)}$ – ефективне напруження зсуву в точці *o* чи у точці *c* (рис.3);

$\beta_{\xi'r(l)}$ – кут повороту ЛС ξ_r' чи ЛС ξ'_l у вершині тріщини

$\beta_{o(c)}$ – кут повороту ЛС ξ'_r і ξ'_l від контактного тертя в точках *o* і *c;*

$$b_{\xi'r(l)} = \frac{f_c\left(1-\frac{2y}{h}\right)\sigma_y(x)}{k_n+\mu\sigma_y(x)}; \quad (15)$$

$$b_{o(c)} = -\frac{f_c\cdot\sigma_y(x_{o(c)})}{k_{o(c)}+\mu\sigma_y(x_{o(c)})}; \quad (16)$$

$\sigma_y(x)$ – функція розподілу нормальних напружень на контактній поверхні; $x_{o(c)}$ – абсциса точки перетину ЛС з віссю симетрії в точці *o* або в точці *c* його вихід на поверхню зразка.

У зв'язку з тим, що в точці d' (рис.3) ефективна дотична напруга досягає значення k_n – межа опору матеріалу до зсуву, утворюється тріщина, яка розвивається по траєкторії максимальних ефективних дотичних напруг. Вираз (15) враховує лінійне згасання напружень зсуву внаслідок зовнішнього тертя при їх віддаленні від контактної поверхні відповідно до виразу $\frac{1-2y}{h}$. Для визначення поточного значення параметра $b_{d'}$ Усередині матеріалу у верхній частині тріщини на ЛС у формулі (15) позначається формулою $b_{\xi'r(l)}$. Точка *o* для ЛС ξ_r' чи точка *c* для ЛС ξ_l' є фіксованими. Тому величина напруги зсуву внаслідок зовнішнього тертя враховується величиною абсциси x_o на вертикальній осі симетрії і в точці *c* при x=o і *y = h*. Знаки мінус і плюс у виразах (15) і (16) вказують на різну роль зовнішнього тертя в контактних площинах.

Параметри $\beta_{\xi'r(l)}$ і $\beta_{O(c)}$ визначаються за допомогою рівнянь

$$\beta_{\xi'r(l)} = \frac{1}{2}arctg\frac{b_{\xi'r(l)}\cos\rho}{\sin\rho-\sqrt{1-b^2_{\xi'r(l)}}}; \quad (17)$$

$$\beta_{o(c)} = \frac{1}{2}arctg\frac{b_{o(c)}\cos\rho}{\sin\rho-\sqrt{1-b^2_{o(c)}}}, \quad (18)$$

Попутно зазначимо, що у формулах (13) (14) параметри $b_{\xi'r(l)}$, $\beta_{'r(l)}$ у точки горизонтальної лінії симетрії, а параметри b_o, β_o в точках на вертикальній лінії симетрії мають нульові значення.

І, на закінчення, відзначимо, що кути нахилу ЛС ξ_r'і ξ_l' визначається за формулою

$$\alpha_{\xi'r(l)} = \frac{3\pi}{4} - \frac{\rho}{2} + \beta_{\xi'r(l)}, \quad (19)$$

Як видно, система рівнянь (7-19) у явному вигляді нерозв'язна, оскільки частина формул є трасдетентними. Рішення рівняння визначення межі міцності зразків при клинової формі руйнації з допомогою цієї системи вироблялося методом ітерацій.

Результати досліджень

В результаті досліджень розроблено аналітичний метод побудови умовних діаграм напруга-подовжня деформація при клинової формі руйнування гірських порід з використанням чотирьох показників їх властивостей (k_n, f_c, μ, E), доступні для експериментального визначення в лабораторіях виробничих підприємств простими технічними засобами.

Використовуючи питомі значення значень, отриманих з форм (7) і (8), можна побудувати діаграму напружень-деформацій (рис. 3, лінія 1). Для цього потрібно зв'язати значення питомої сили з деформацією зразка, що визначається за формулою

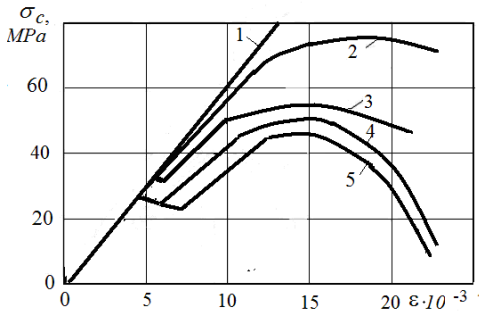
$$\varepsilon = \frac{p}{E}, \quad (20)$$

де E – модуль пружності .

Але в практиці деформації тіл прийнято використовувати умовні діаграми з відношенням змінної площі опори в процесі руйнування до початкової одиничної довжини зразка, яка описується формулою

$$S = (x+Xo)/a_1 \quad (21)$$

На рис. 3 приведені діаграми при: k_n=10 MPa, ρ=*39*°; f_c = 0,27, E = 5500 MPa і різної висоти зразка.



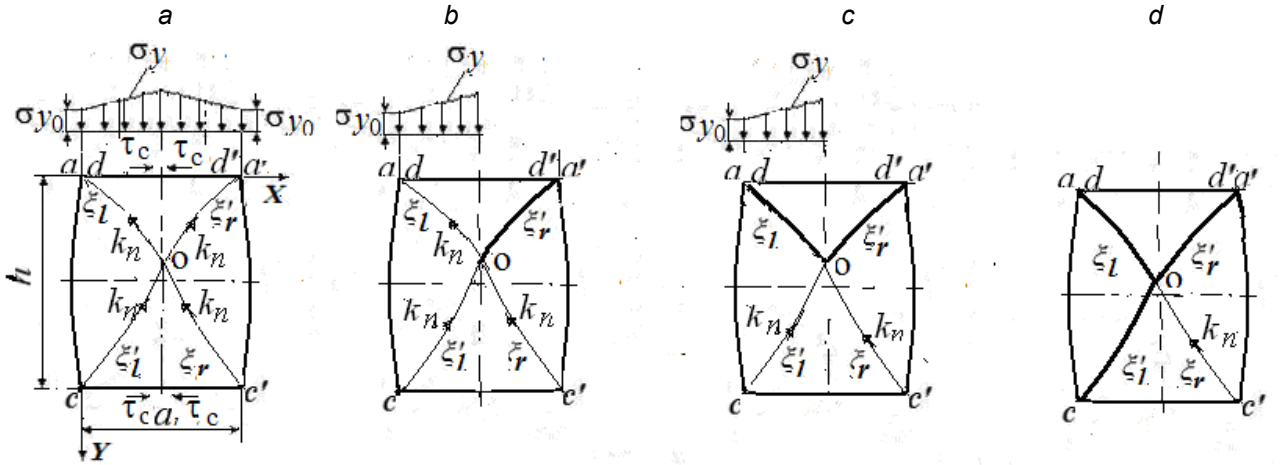
1 — істина діаграма; умовні діаграми при: 2- $y_м$=1.0a_1; 3-$y_м$ = 1.1a_1;
4- $y_м$ = 1.6a_1 ;5 - $y_м$ = 2.0a_1
Рисунок 3 – Діаграми напружень-деформацій у клиноподібному вигляді руйнування зразка

Помноживши величину деформації за виразом (20) на величину відносної площі S (21), отримаємо залежність між параметрами умовних діаграм «поздовжнє напруження – поздовжня деформація».

Як видно, система рівнянь (7-21) явно нерозв'язна, так як деякі з формул є трансдетенційними. Розв'язання рівнянь для визначення міцності на розрив зразків за допомогою цієї системи проводилося методом ітерацій. Для цього висоту зразка розділили на 18 – 20 рядів і визначили для кожного з них значення напруги σ_y Вершина тріщини, питомі сили p, ε деформація, заграничні напруги σ.

З використанням отриманих даних будуємо криву руйнування зразка правильної геометрії, за максимальним значенням якої визначається межа міцності зразка (рис. 3, крива 2). Досі ми описали метод та результати розрахунку діаграм призматичного зразка правильної геометрії. Максимальне значення кривої 2 становить 76.4 МРа.

Тепер перейдемо до основного питання, визначення зміни межі міцності порід від висоти зразка. Тут звернемо увагу читача на точку d' зародження тріщин. Координати цієї точки визначаються вимогою виходу ЛС ξ_l в кутовій точці в. Ця точка є найбільш відкритою для ЛС ξ_l. Зі збільшенням висоти зразка змінюється положення точки перетину ЛС з вертикальною лінією симетрії зразка щодо верхньої горизонтальної площини. Відстань точки *o* від нижньої площини залишається постійною. Таким чином, у зразку правильної геометрії при ρ=*39*°; f_c = 0,3 точка d' знаходився на відстані від правого кута 0.495a_1 (x_0=0.495a_1 в формулах (7) и (8)). У міру збільшення висоти екземпляра x_0 зменшується і при певній висоті вибірка дорівнює нулю (рис. 4). Розрахуємо на висоті вибірки $y_м$=1.1a_1. Відмтим, значення x_0 в Процес розрахунку слід підбирати таким чином, щоб абсциса точки С дорівнювала нулю. Так що для цієї висоти x_0 дорівнює 0.355 а діаграма "напруга – дефомінація" має вигляд (рис. 3, крива 3). Як бачите, плавність кривої порушена σ_c.



a)– на момент предруйнування; *b*) – в момент формування клиноподібної сторони;
c) – в момент формування клина; *d*) – У момент формування клиновидної форми

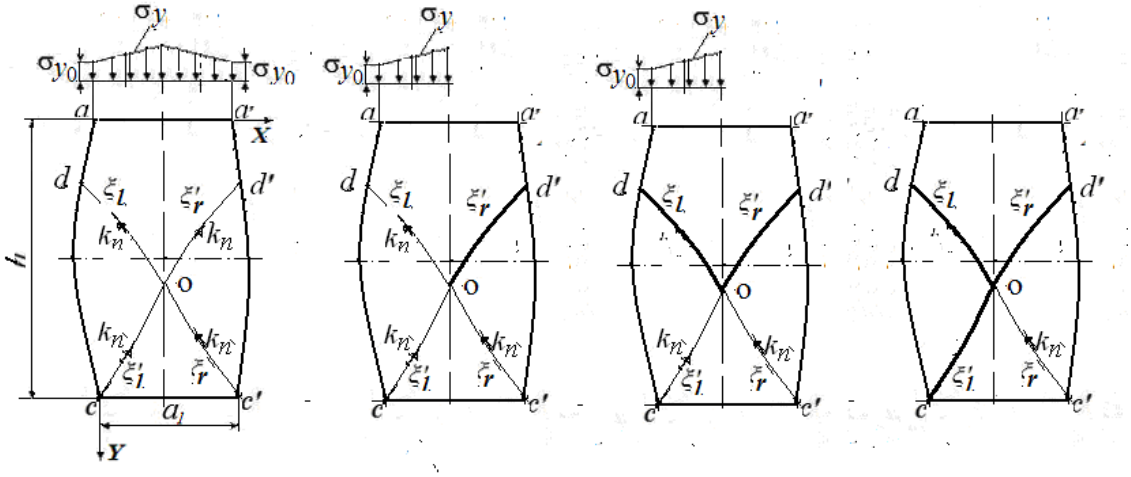
Рисунок 4 – Схема формування клиноподібної форми високого призматичного зразка породи для його стиснення зі зменшенням параметра x_0

Виник зброс напруження, підтверджене експериментальними спостереженнями. У момент скидання з'являється так звана зона плинності, формування якої ми пояснюємо переходом процесу злому від опуклої лінії ковзання до увігнутої, що формує різний характер трансцендентних

кривих. Розломи викликані опуклістю першої тріщини, яка тягнеться до тих пір, поки вона не перетне вертикальну лінію симетрії. Всі трансцендентні криві в усіченому клиноподібному вигляді зразкового злому мають низхідний характер, який руйнується опуклими тріщинами. Крива виходу за межі поля має криву затвердіння, яка ще не отримала теоретичного обґрунтування. Пояснюємо це явище переходом процесу руйнування в увігнуту лінію ковзання, для якої характерна така особливість.

Розрахунки показують, що параметр x_0 дорівнює нулю при висоті зразка, що дорівнює 1,6a_1. У цих умовах діаграма напружень-деформацій має вигляд рис. 3, крива 4. Площа «врожайності» збільшується зі збільшенням висоти екземпляра.

Тепер перейдемо до розрахунку, коли ЛС ξ_r поширюється на бічну поверхню зразка при x_0, дорівнює нулю (рис. 5). Точка d' з цієї ж умови знаходимо абсцису виходу тріщини в точці с. У програмі розрахунку послідовно вводимо координати точки d'. За сукупністю розрахункових даних будуємо діаграми "напруга - деформація" (рис. 3, крива 5)



a)– на момент передруйнування; *b*) – у момент утворення сторони клину;
c) – у момент формування клина*; d*) – в момент формування клиноподібної форми

Рисунок 4 – Схема формування клиноподібної форми високого призматичного зразка породи для його стиснення на початку зламування з бічної поверхні

Обговорення результатів розрахунків.

Як видно, зі збільшенням висоти зразка межа міцності зразка зменшується. Це видно з аналізу діаграм, представлених на рис. 3. Максимальні точки позамежних кривих діаграм зменшуються з кожним збільшенням висоти вибірки. Таким чином, межа міцності зразка на розрив знижується з 67,0 МПа до 47,0 МПа (рис. 5), приблизно на 30%. За зовнішнім виглядом крива, показана на рис. 5 нагадує експериментальну криву, показану на рис.2.19 [2].

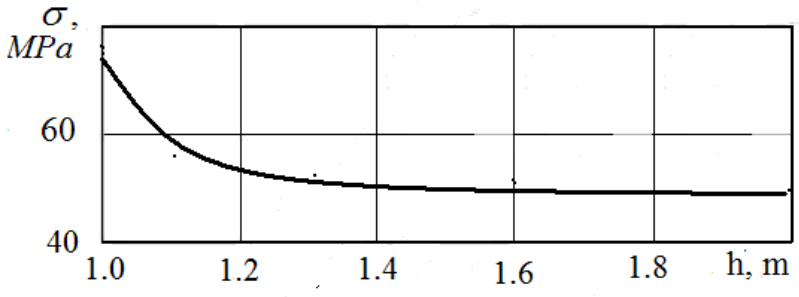


Рисунок 5 – Залежність міцності зразка на розрив від висоти зразка

Розрахунок показує, що з f_c= 0, k_n=10 МРа, ρ=39°, E = 5500 МРа межа міцності зразка σ дорівнює 42,0 МПа. Спроби знизити межу міцності зразка на розрив до рівня σ = 42,0 МПа шляхом збільшення висоти зразка аналітично не увінчалися успіхом. Справа в тому, що в міру збільшення висоти екземпляра ми зменшуємо коефіцієнт тертя на верхній половині зразка, а на нижній він залишається незмінним. Тому ми вважаємо, що повністю усунути контактне тертя шляхом збільшення висоти зразків експериментально неможливо.

Висновки

1. Розроблено аналітичний метод розрахунку міцності зразка на розрив залежно від висоти зразка з використанням чотирьох показників (міцність матеріалу на зсув, коефіцієнти внутрішнього та контактного тертя, модуль пружності) властивостей

гірських порід, що дозволяє виявити фізичні особливості руйнування високих зразків.

2. Максимальні точки вихідних кривих діаграм зменшуються з кожним збільшенням висоти вибірки. Таким чином, межа міцності зразка на розрив при f_c= 0, k_n=10 MPa, ρ=39°, E = 5500 MPa зменшується с 67.0 MPa до 47.0 MPa (рис. 5), приблизно на 30 %.

3. Збільшення висоти зразка з появою першої тріщини супроводжується скиданням запредельної кривої діаграм «напруження – деформація», при цьому величина скидання зростає зі збільшенням висоти зразка. Скидання викликані опуклістю першої тріщини, яка розвивається до перетину нею вертикальної лінії симетрії.

4. Запредельна крива включає криву зміцнення, яка поки що не отримала теоретичного обґрунтування в механіці гірських порід. Це явище ми пояснюємо переходом процесу руйнування на ввігнуту лінію ковзання, яка характеризується такою особливістю.

5. Повністю виключити контактне тертя шляхом збільшення висоти зразків експериментально неможливо.

Перелік посилань

1. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения прочности при одноосном сжатии. – М.: Гостстандартиздат, 1984. – 84 с.
2. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – М.: Стандартинформ, 2010. – 102 с.
3. Васильев, Л.М. Механика образования форм разрушения образцов горных пород при их сжатии: монография / Л.М. Васильев, Д.Л. Васильев, Н.Г. Малич, А.А. Ангеловский. – Днипро: ИМА-пресс, 2018, 150 с.
4. Виноградов, В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / В.В. Виноградов. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
5. Несмашный, Е.А. Оптимизация геометрическиих параметров открытх горных выработок. / Е.А. Несмашный. – Кривой Рог: Минерал, 2001. – 118 с.
6. Литвинский, Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов / Г.Г. Литвинский. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 190 с.
7. Шашенко, А.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород / А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.Н. Гапеев. – Дніпропетровськ: НГУ України, 2008.–224 с
8. Петренко, В.Д. Проблема визначення деформацій оправиперегінних тунелів при суттєвій зміні інженерно-геологічних умов / В.Д. Петренко, О.Л. Тютькін, Є.Ю. Кулаженко //Зб.наук.пр. "Мости та тунелі, теорія, дослідження, практика" / ДНУЗТу. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип.5. – С. 62-69.
9. Петренко, В.Д. Оцінка стійкості природних східів методами математичного моделювання в програмі "ОТКОС" / В.Д. Петренко, О.Л. Тютькін, О.І. Лубінчик, В. Р. Кільдеев // Зб.наук.пр. Дніпетровського університету залізничного транспорту "Мости та тунелі, теорія, дослідження, практика" / ДНУЗТу.– Дніпропетровськ,. 2015. – Вип.8. – С. 23-32.
10. Irfan Ghani, Dynamic Development of Hydrofracture / Irfan Ghani, Daniel Koehn, Renaud Toussaint, Cees Willem Passchier // Pure and Applied Geophysics – 2013. – Vol. 170. – Iss. 11 – pp. 1685 – 1703.
11. 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.
12. Mingqing, Y. Mechanical characteristic of the exponential strength criterion under conventional stresses / Y. Mingqing // Int J Rock Mech Min Sci. – 2010. – Vol. 47. – Iss. 2. – P. 195-204.
13. Zhao, X.G. A mobilized dilation angle model for rocks/ X.G. Zhao, M. Cai// Int J Rock Mech Min Sci. – 2010. – Vol. 47. – Iss. 3. – P. 368-384.
14. Feiying Ma, Staged Coalbed Methane Desorption and the Contribution of Each Stage to Productivity / Feiying Ma, Yongqing Wang, Haitao Li, Lin Wang, Hui Wang, Rui Jiang // Chemistry and Technology of Fuels and Oils – 2014. – Vol. 50. – Iss. 4 – pp. 344-353.
15. Erik Eberhardt, The Hoek–Brown Failure Criterion / Erik Eberhardt // Rock Mechanics and Rock Engineering – 2012. – Vol. 45 – Iss. 6 - pp 981–988.
16. Agustawijaya, D. S., The Influence of Rock Properties and Size into Strength Criteria: A Proposed Criterion for Soft Rock Masses / Agustawijaya, D. S. // Civil Engineering Dimension – 2011. – Vol. 13 – Iss. 2 – pp 75-81.

References

1. Ministry of Coal Industry of the USSR. (1984). Rocks. Methods for determination of axial compression strength. (State standard 21153.2-84)
2. Interstate council for standardization, metrology and certification (ISC). (2010). State standard 12248-2010. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniia kharakteristik prochnosti i deformiruemosti. [Soils. Methods for laboratory determination of strength and deformability characteristics]. (State standard 12248-2010)
3. Vasilev, L. M., Vasilev, D. L., Malich, N. G., & Angelovskii, A. A. (2018). *Mekhanika obrazovaniia form razrusheniia obraztsov gornykh porod pri ikh szhatii*, IMA-press
4. Vinogradov, V. V. (2018). *Geomekhanika upravleniia sostoianiem massiva vblizi gornykh vyrabotok*. Naukova dumka
5. Nesmashnyi, E. A. (2001). *Optimizatsiia geometricheskiikh parametrov otkrytkh gornykh vyrabotok*. Mineral
6. Litvinskii, G. G. (2008). *Analiticheskaia teoriia prochnosti gornykh porod i massivov*. Nord-Press
7. Shashenko, A. N., Sdvizhkova, E. A., & Gapeev, S. N. (2008) *Deformiruemost i prochnost massivov gornykh porod*. NGU Ukraïni

8. Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., & Kulazhenko, Ye. Yu. (2014). Problema vyznachennia deformatsii opravyperehinnykh tuneliv pry suttievii zmini inzhenerno-heolohichnykh umov. *Bridges and Tunnels: theory, research, practice*, (5), 62-69.
9. Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Lubinchyk, O. I., & Kildeev, V. R.(2015). Otsinka stiikosti pryrodnykh skhidiv metodamy matematychnoho modeliuvannia v prohrami "OTKOS". *Bridges and Tunnels: theory, research, practice*, (8), 23-32.
10. Ghani, I., Koehn, D., Toussaint, R., & Passchier, C. W. (2013). Dynamic Development of Hydrofracture. *Pure and Applied Geophysics*, *170*(11), 1685 – 1703
11. Zhang, L., Cao, P., & Radha, K. C. (2010). Evaluation of rock strength criteria for wellbore stability analysis. *Int J Rock Mech Min Sci*., *47*(8), 1304-1316
12. Mingqing, Y. (2010). Mechanical characteristic of the exponential strength criterion under conventional stresses. *Int J Rock Mech Min Sci*., *47*(2), 195-204
13. Zhao, X. G., & Cai, M. (2010). A mobilized dilation angle model for rocks. *Int J Rock Mech Min Sci*, *47*(3), 368-384
14. Ma, F., Wang, Y., Li, H., Wang, L., Wang, H., & Jiang, R. (2014). Staged Coalbed Methane Desorption and the Contribution of Each Stage to Productivity. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, *50*(4), 344-353
15. Eberhardt, E. (2012). The Hoek–Brown Failure Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(6), 981–988
16. Agustawijaya, D. S. (2011). The Influence of Rock Properties and Size into Strength Criteria: A Proposed Criterion for Soft Rock Masses. *Civil Engineering Dimension*, *13*(2), 75-81.

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 27.02.2024
Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.05.2024