

DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-183-192](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-183-192)
УДК 622.271

**О.О. Фролов, д.т.н., проф.
М.І. Бельтек, аспірант
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»**

Дослідження впливу тріщинуватості скельного гірського масиву на коефіцієнт структурного ослаблення

Представлено основні характеристики гірських порід, які визначають їх міцнісні показники, та зазначено, що здебільшого в розрахунках використовують межу міцності на стиснення. Наведено фактори, що впливають на міцність та стійкість неоднорідного скельного гірського масиву, та зазначено, що тріщинуватість порід є визначальним показником міцності усього масиву, яку можна враховувати коефіцієнтом структурного ослаблення або закордонними його аналогами.

За результатами аналізу різноманітних підходів і методик встановлення коефіцієнта структурного ослаблення скельного гірського масиву та їх закордонних аналогів запропоновано поділити їх на три групи. До першої групи рекомендовано внести табличні та графічні способи визначення коефіцієнта структурного ослаблення залежно від тріщинуватості гірського масиву. Другу групу можуть складати аналітичні формули з визначення цього коефіцієнта лише за значенням модуля тріщинуватості гірських порід. До третьої групи зараховують вирази з розрахунку коефіцієнта структурного ослаблення, які, крім тріщинуватості, містять додаткові фактори, що впливають на міцність гірського масиву.

Для перших двох груп на одному графіку виконано суміщення усіх представлених графічних залежностей зміни чисельних значень коефіцієнта структурного ослаблення від модуля тріщинуватості скельного гірського масиву. Встановлено закономірності їх зміни та побудована загальна залежність в результаті їх апроксимації, для якої отриманий аналітичний вираз у вигляді поліному 3-го степеня. Вибір кривої апроксимації проведено для умов отримання максимального значення показника достовірності апроксимації, який у такому разі становить 0,891.

Виявлено, що із загального характеру змін випадають дві залежності, які, для мало- та середньотріщинуватих порід, показують більш інтенсивне зниження коефіцієнта структурного ослаблення. Після виключення їх з загального аналізу максимальний показник достовірності апроксимації склав 0,9383.

Ключові слова: скельний гірський масив; гірська порода; коефіцієнт структурного ослаблення; міцність; модуль тріщинуватості; межа міцності; ступінь порушеності масиву.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими практичними завданнями. Основними характеристиками гірських порід, які визначають їх міцнісні показники, є межа міцності на стиснення, межа міцності на розтягнення, межа міцності на зсув, кут внутрішнього тертя та величина зчеплення гірських порід. При цьому здебільшого розрахунок параметрів технологічних процесів гірських робіт у нормативно-довідковій літературі базується лише на межі міцності гірських порід на одноосьове стиснення (наприклад, коефіцієнт міцності порід за шкалою проф. Протод'яконова) і це вважається достатнім. У той же час дослідниками рекомендується в розрахунках використовувати фактичне значення межі міцності гірських порід (так званий розрахунковий опір) на стиснення, яким характеризується гірський масив у реальних умовах, тобто з урахуванням шарів породи, що містять різної міцності, блочності, тріщинуватості та ін.

Однак слід зазначити, що при веденні гірничих робіт змінюється напружено-деформований стан гірського масиву, а саме: в зонах, схильних до деформацій, відбувається розкриття існуючих тріщин тектонічного походження і утворення нових тріщин у результаті розриву суцільності масиву за площинами ослаблення. Таким чином, в результаті протікання таких процесів формується просторова неоднорідність структури гірського масиву [1].

Для врахування знов утворених властивостей гірських масивів вченими рекомендовано в розрахунках застосовувати коефіцієнт структурного ослаблення. Інколи цей коефіцієнт називають ще коефіцієнтом зниження міцності гірського масиву. За своєю сутністю він є параметром, що характеризує ступінь відмінності міцності породного масиву від міцності зразка гірської породи та дозволяє уточнювати механічну міцність масиву. Це збільшує обсяг інформації, необхідний для розрахунку параметрів технологічних процесів з виймання порід [2]. Тому дослідження факторів, які впливають на значення коефіцієнта структурного ослаблення скельного гірського масиву, є безумовно актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загалом нормативно-довідкова та науково-технічна література рекомендує визначати розрахунковий опір скельних гірських порід на стиснення за формулою [3, 4]:

$$R_c = K_c \sigma_{ст}, \text{ Па} \quad (1)$$

де K_c – коефіцієнт структурного ослаблення масиву, який враховує порушеність гірського масиву в реальних умовах; $\sigma_{ст}$ – межа міцності гірських порід на одноосьове стиснення, встановлене за результатами випробувань у зразку, Па.

Як зазначено у [2], структурне ослаблення масиву гірських порід може бути двох типів. Перший тип ослаблення характеризується поверхнями великої протяжності і площини, по яких відбувається ковзання однієї частини деформованого масиву відносно іншої. Такими поверхнями можуть бути контакти між шарами поверхні розшарування, диз'юнктивні порушення та тектонічні тріщини великої довжини. Другий тип структурного ослаблення утворюється на площинах обмежених розмірів, які також зміщені у просторі одна відносно іншої. Такі поверхні ослаблення надають масиву блокову будову зі слабкими зв'язками між блоками. В цьому разі поверхніми ослаблення є порушення цілісності різного походження – тектонічні тріщини; гравітаційні розшарування; тріщини, що утворені внаслідок ведення вибухових робіт або інших динамічних навантажень та ін.

Виявлення структурних послаблень першого типу не становить особливих труднощів, оскільки вони визначаються на стадії розвідки родовища та враховуються під час проектування та виконання виробничих процесів гірничих робіт. Визначення коефіцієнта структурного ослаблення другого типу є досить складним завданням, оскільки на його величину впливатиме ціла низка факторів, зокрема, форма природної окреомості, неоднорідність окремих блоків за міцністю, шаруватість та кліваж скельного гірського масиву.

У [5] виконано аналіз факторів, що впливають на міцність та стійкість неоднорідного гірського масиву. В цілому було виявлено сім основних факторів, зокрема, це тріщинуватість; різноміцнісність порід, що складають масив; форма структурних блоків; співвідношення їх лінійних розмірів; наявність у скельному масиві косих тріщин, які перетинають основні системи тріщини під кутом 40–45°; взаємне розташування структурних блоків у сусідніх шарах масиву; початковий напрям дії головного напруження на гірській масив при зовнішньому навантаженні. Також додатковим та достатньо важливим фактором є якість та ступінь заповнення природних тріщин природними включеннями. Як зазначено авторами, майже в усіх формулах, які пропонуються для визначення K_c , в основу покладено врахування тріщинуватості гірського масиву і лише певні з них додатково враховують деякі зазначені вище фактори, зокрема, кут падіння системи природних тріщин, мінімальний розмір структурного блоку в скельному масиві гірських порід, різноміцність гірських порід та ін. Отже, повного і комплексного врахування усіх вказаних вище факторів впливу на міцність скельного гірського масиву не встановлено, що можна пояснити складністю та різнонаправленістю їх дії.

Мета дослідження. На підставі аналізу наукових літературних джерел з питань визначення факторів, що впливають на природній стан скельного гірського масиву та різних підходів щодо розрахунку чисельних значень коефіцієнта структурного ослаблення, сформульовано мету досліджень у цій публікації, яка полягає у встановленні закономірностей зміни коефіцієнта структурного ослаблення залежно від ступеня тріщинуватості скельного гірського масиву.

Викладення основного матеріалу. Чисельні значення коефіцієнта структурного ослаблення зазвичай встановлюються в лабораторних та/або натурних умовах. Аналіз різних підходів і методів визначення коефіцієнта структурного ослаблення гірського масиву показує, що їх можна розділити на три групи. До першої групи можна зарахувати дослідження, які надають табличні або графічні дані, тобто у найпростішому випадку кожному ступеню тріщинуватості скельних порід відповідає певна рекомендована величина K_c [6–9]. Другу групу досліджень можна представити у вигляді емпіричних залежностей, які надають більш точні та розширені результати з визначення коефіцієнту структурного ослаблення скельного гірського масиву K_c залежно від модуля тріщинуватості K_m (10–12). І в третю групу можна виокремити науковців, які зазначають, що оцінювати та встановлювати значення коефіцієнта структурного ослаблення гірського масиву тільки на підставі врахування тріщинуватості порід є недостатнім, оскільки різниця міцності породи в лабораторному зразку та в гірському масиві визначається не тільки модулем тріщинуватості, але й цілою низкою інших факторів, які виявлені та проаналізовані в роботі [5].

Так, згідно з нормативною літературою [6], коефіцієнт структурного ослаблення гірського масиву необхідно визначати на підставі отриманих даних інженерно-геологічних вишукувань з визначення середньої відстані між поверхнями ослаблення скельних гірських порід, тобто по середній відстані між тріщинами (табл. 1).

Таблиця 1

Значення коефіцієнта структурного ослаблення масиву K_c

Середня відстань між тріщинами в гірських породах, м	K_c
Більше за 1,5	0,9
1,5...1,0	0,8
1,0...0,5	0,6
0,5...0,1	0,4
менше за 0,1	0,2

На підставі аналізу натурних вимірювань дослідниками була отримана графічна залежність коефіцієнта структурного ослаблення від модуля тріщинуватості скельного гірського масиву, тобто кількості тріщин на один погонний метр [7], яка зображена на рисунку 1.

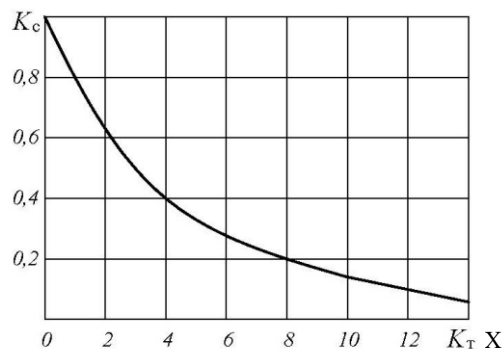


Рис. 1. Графік залежності коефіцієнта структурного ослаблення K_c від модуля тріщинуватості масиву скельних порід K_m

Науковці в роботі [8] рекомендують приймати такі значення коефіцієнта структурного ослаблення K_c залежно від типу порушеності гірського масиву (табл. 2).

Таблиця 2

Значення коефіцієнта структурного ослаблення масиву K_c

Тип порушеності масиву гірських порід	Монолітні, слаботріщинуваті	Середньотріщинуваті	Сильнотріщинуваті	Зони дроблення, геологічні порушення
Коефіцієнт структурного ослаблення, K_c	0,8	0,5	0,4...0,3	0,2...0,1

Як зазначає автор роботи [9], механічні характеристики гірських порід у масиві переважно визначаються їх порушенням та ослабленням по тріщинах. Коефіцієнт ослаблення порід різної тріщинуватості наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Значення коефіцієнта ослаблення порід K_c різної тріщинуватості (за І.С. Поповим)

Характеристика тріщинуватості	Коефіцієнт ослаблення	
	Межі зміни	Середнє значення
Густа мережа з усіх напрямків, нецементовані шматки	0,00...0,01	0,0005
Густа мережа видимих тріщин у всіх напрямках	0,001...0,020	0,005
Густа тріщинуватість	0,01...0,04	0,02
Тріщинуватість вища за середню	0,04...0,09	0,06
Середня тріщинуватість через 20–30 см	0,09...0,12	0,10
Нижче середньої тріщинуватості	0,12...0,30	0,20
Мережа глибоких тріщин через 30–50 см	0,30...0,40	0,35
Малотріщинуваті породи, закриті тріщини	0,40...0,60	0,40
Мікротріщини майже відсутні	0,60...0,80	0,70
Монолітні породи без ознак тріщинуватості	0,8...1,0	0,90

З емпіричних залежностей по встановленню чисельного значення коефіцієнта структурного ослаблення масиву залежно від модуля тріщинуватості найбільш відома формула Сакураї [10]:

$$K_c = 0,15 + \frac{0,85}{0,15K_T + 1}, \quad (2)$$

де K_T – модуль тріщинуватості.

У роботі [11] обґрунтовано вираз для оцінки коефіцієнта структурного ослаблення, який у остаточному вигляді може бути представлений як

$$K_c = \frac{0,7 + 0,8(1 - V_\sigma)}{1,25(0,2J_T + 1)}, \quad (3)$$

де V_σ – коефіцієнт варіації одиничних значень міцності порід у лабораторних випробуваннях, який змінюється в межах від 0 до 0,5; J_m – модуль тріщинуватості гірського масиву.

У [8] вказана також формула для визначення коефіцієнта структурного ослаблення для гірських порід вугільного регіону Кузбаса, яка по суті апроксимує табличні значення K_c з [6] залежно від середньої відстані між тріщинами:

$$K_c = 0,8 - 0,29 \ln W + 0,01 \ln^2 W, \quad (4)$$

де W – модуль тріщинуватості, який визначається кількістю тріщин на одиницю довжини ($W = 1/l_m$, де l_m – середня відстань між тріщинами).

За результатами досліджень, наведених в [12], для умов породних скельних масивів Казахстану отримана дещо інша залежність коефіцієнта структурного ослаблення від модуля тріщинуватості J_m :

$$K_c = \frac{1}{J_T^{0,94}}. \quad (5)$$

Однак, як зазначають науковці, визначати значення коефіцієнта структурного ослаблення гірського масиву K_c лише на підставі врахування тріщинуватості є недостатнім. Чисельні дослідження показують, що різниця в міцності порід у зразку і породному масиві визначається не тільки значенням тріщинуватості скельної породи, але й також орієнтацією тріщин, ступенем їх розкриття, якістю заповнення простору між ними, масштабним ефектом, наявністю води та ін.

Так, згідно з [13], рекомендована така формула для визначення коефіцієнта структурного ослаблення K_c , яка враховує кут нахилу тріщин:

$$K_c = \frac{1}{1 + q^m m_2 \left[\sin(2\alpha - \varphi) - \frac{C}{\sigma_{cr}} \right] \sigma_{cr}^n \ln(q)^{-1}}, \quad (6)$$

де α – кут падіння системи тріщин; φ – кут внутрішнього тертя гірських порід; C – зчеплення на контактних поверхнях окремоостей, МПа; m_1, m_2, n – емпіричні коефіцієнти: $m_1 = -0,447$; $m_2 = 2,34 \cdot 10^{-5}$; $\xi = \ln(15\gamma H)$; q – ступінь порушеності гірського масиву.

Для розрахунку K_c з урахуванням розмірів структурних блоків у [14] запропоновано вираз

$$K_c = 1 - \sqrt{\frac{L_{\min}}{L_\chi}} \left[1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_{cm}} \sqrt{\frac{L_{\min}}{2,5}} \right], \quad (7)$$

де L_{\min} – мінімальний розмір структурного блоку в масиві гірських порід, см; L_χ – середня відстань між тріщинами окремоостей, см; σ_p – межа міцності порід масиву на розтягнення, Па; σ_{cm} – межа міцності породи на стиснення, Па.

Моделюванням блочного масиву з незалікованими тріщинами [15] отримана така залежність:

$$K_c = \frac{1}{0,53 \left(\frac{l}{l_\delta} + 1,75 \right)} + 0,315, \quad (8)$$

де l – розмір дільниці масиву, l_δ – розмір структурного блоку.

Для міцних гірських порід авторами [16] наведено зв'язок коефіцієнта структурного ослаблення K_c з виходом керна та тріщинуватістю:

$K_c = 0,4 \dots 0,5$ в слаботріщинуватих породах при виході керна більше за 80 %, кількості тріщин на 1 м^2 від 0 до 8, відстані між тріщинами більше 35 см і частки шматків з діагоналлю більше за 70 см 70 % та вище;

$K_c = 0,2 \dots 0,4$ в середньотріщинуватих породах з виходом керна 45...80 % при питомій тріщинуватості 8...15 тріщин/ м^2 , відстані між тріщинами 15...35 см і частці шматків з діагоналлю більше за 70 см 20...70 %;

$K_c = 0,1...0,2$ у сильнотріщинуватих породах з виходом керна 30...45 % при питомій тріщинуватості 15...30 тріщин/м², відстані між тріщинами 5...15 см і частці шматків з діагоналлю більше за 70 см 1...20 %.

У тій же роботі [16] автори пропонують формулу Хансаги, яка пов'язує розрахунок коефіцієнта структурного ослаблення тріщинуватого масиву з виходом керна:

$$K_c = \frac{\left(L + \frac{K^2}{N} \right)}{2L_K}, \quad (9)$$

де L – сумарна довжина частин керна, які рівні або більші за його діаметр, м; K – вихід керна, м; N – кількість частин керна; L_K – довжина керна, який підлягає дослідженню, м.

Автори роботи [17] величину коефіцієнта структурного ослаблення породного масиву рекомендують визначати, враховуючи значення коефіцієнта варіації міцності:

$$K_c = 1 - \sqrt{0,5\eta} \exp(-0,25)\eta, \quad (10)$$

де η – коефіцієнт варіації міцності породного масиву, який визначається за формулою:

$$\eta = \sqrt{\frac{l_t + l_0}{l_t} (\eta_0^2 + 1)} - 1, \quad (11)$$

де l_t – середня відстань між тріщинами; l_0 – характерний розмір стандартного породного зразка; η_0 – коефіцієнт варіації результатів випробувань гірських порід на одноосьове стиснення.

У [18] наводиться визначення коефіцієнта структурного ослаблення тріщинуватого масиву з урахуванням радіуса зони утворення тріщин при вибуховому навантаженні (за А.П. Андрієвським)

$$K_c = \frac{1}{0,97 + 0,13 \frac{R_{mp}}{l_t}}, \quad (12)$$

де l_m – середня відстань між існуючими тріщинами; R_{mp} – радіус зони тріщиноутворення у монолітному гірському масиві при дії в ньому вибухового навантаження, м.

Науковці-дослідники Мосинець В.Н. та Абрамов А.В. вважають, що коефіцієнт структурного ослаблення треба визначати за формулою [19]:

$$K_c = \frac{1}{1 + 0,25\sigma_p \ln \frac{W}{l_{сеп}}}, \quad (13)$$

де W – лінія найменшого опору, см; $l_{сеп}$ – середня відстань між тріщинами, см; σ_p – межа міцності гірської породи на розтягнення, МПа.

За кордоном широко застосовується методика оцінки тріщинуватості гірських порід за показником якості породи RQD (Rock Quality Designation), який визначається як добуток величини виходу керна у відсотках (Z), на відношення сумарної довжини непорушених шматків керна, кожен з яких має довжину щонайменше 10 см (Σl_i), до всієї довжини досліджуваного інтервалу (L) [20], тобто

$$RQD = Z(\Sigma l_i/L). \quad (14)$$

На основі показника якості RQD побудовані графіки та складено таблиці для визначення характеру умов проведення виробок.

Також існують методи Діра та Хансаги, які дозволяють визначати коефіцієнт структурного ослаблення на підставі врахування кількості зразків, діаметр і довжину керна. Як зазначають автори в [20], у методиці RQD , методів Хансаги і Діра відсутні аналітичні обґрунтування, які б дозволили встановити реальний стан гірського масиву, тобто це спосіб отримання певної величини, яка придатна лише для якісної оцінки гірських порід за рівнем їх порушеності.

У роботі [21] для оцінки стану гірського масиву пропонують використовувати індекс гірничої маси RMi , який був розроблений для характеристики міцності порід, що використовуються у будівництві. Основна увага при розробці RMi була приділена впливу дефектів у масиві гірських порід, які знижують міцність непорушеного масиву гірських порід. RMi характеризує власне тільки властивості масиву гірських порід, тобто зовнішнє місцеве навантаження гірських порід, тиск води або вплив людської діяльності не враховуються. Також в RMi не включені форми блоку. Основною причиною такого підходу є підтримка простої структури RMi . Таким чином, RMi являє собою знижену міцність гірських порід, викликану тріщинуватістю, і виражається як

$$RMi = \sigma_c \cdot JP. \quad (15)$$

де σ_c – межа міцності гірської породи на стиснення; JP – параметр, який враховує фактори зниження міцності гірського масиву, зокрема, розмір природного блоку і стан його поверхонь, фракційні властивості масиву і розміри тріщин.

Значення JP змінюється майже від 0 для щебеню до 1 для непорушених порід та визначається комбінацією розміру блоку та умов тріщинуватості. По суті показник JP є повним аналогом коефіцієнта структурного ослаблення гірського масиву K_c .

Також існує критерій переходу від міцності зразка породи до міцності гірського масиву за методикою Хоека – Брауна [22]. Міцність на одноосьове стиснення породи в масиві визначається за:

$$\sigma_{ст.м} = \sigma_{ст.зр} s^a, \quad (16)$$

де $\sigma_{ст.зр}$ – міцність гірської породи на одноосьове стиснення у зразку; s , a – безрозмірні постійні величини для певного гірського масиву.

Як бачимо, параметр s^a в критерії Хоека – Брауна враховує порушеність гірського масиву і зниження його міцності, тобто за своєю суттю є аналогом K_c . Як зазначають науковці, методика Хоека – Брауна не має строгого теоретичного обґрунтування, базуючись лише на емпіричному підході.

Таким чином, аналіз досліджень з визначення коефіцієнта структурного ослаблення гірського масиву K_c та факторів, які на нього впливають, показав, що існують різноманітні підходи до оцінки міцності гірського масиву як в Україні, такі за кордоном. Для узагальнення результатів виконано суміщення на одному графіку залежностей коефіцієнта структурного ослаблення гірського масиву K_c від модуля тріщинуватості для першої і другої групи досліджень, оскільки вони надають однозначну оцінку показника (рис. 1). Для формули (3) з [11] коефіцієнт варіації одиничних значень міцності порід у лабораторних випробуваннях прийнято 0,5.

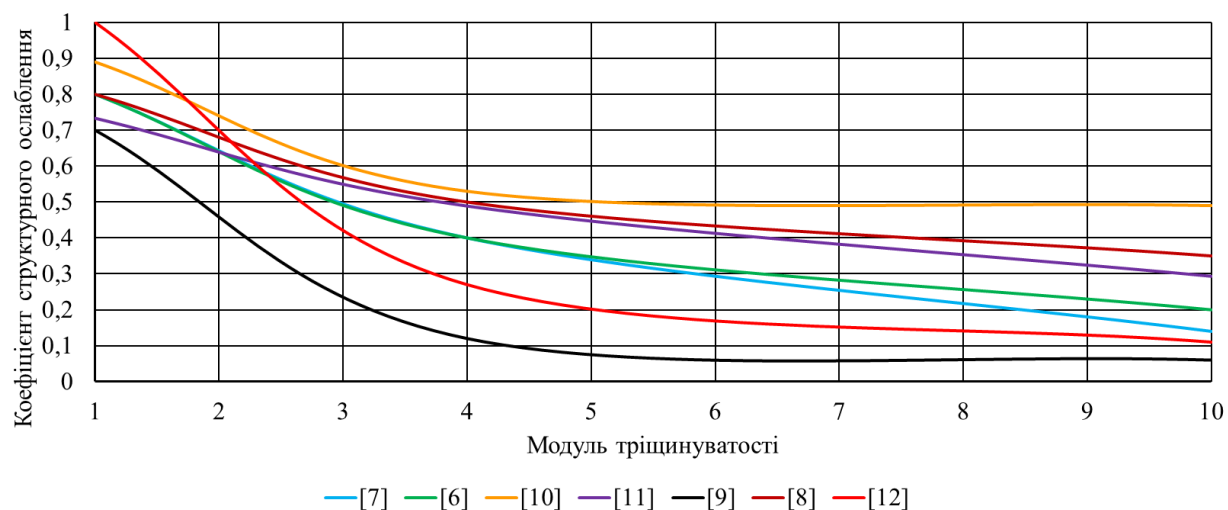


Рис. 2. Залежності коефіцієнта структурного ослаблення від модуля тріщинуватості скельного гірського масиву (за даними різних авторів)

Аналіз графічних залежностей (рис. 2) коефіцієнта структурного ослаблення K_c від модуля тріщинуватості скельного гірського масиву K_m показує, що характер їх зміни майже однаковий. Однак, із загального характеру змін випадають дві графічні залежності (авторів [9] та [12]), які для мало- та середньотріщинуватих порід показують більш інтенсивніше зниження коефіцієнта структурного ослаблення. Для графіків, що представлені на рисунку 2, проведено апроксимацію їх чисельних показників у представлених межах змін (рис. 3). Вибір кривої апроксимації проведено для умови отримання максимального значення показника достовірності апроксимації R^2 .

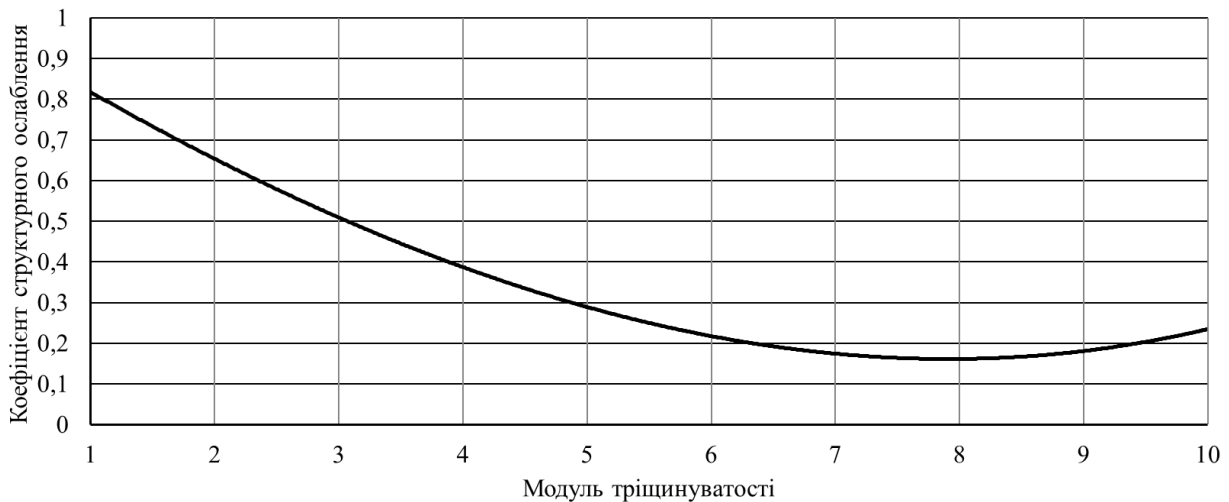


Рис. 3. Графічна залежність зміни коефіцієнта структурного ослаблення масиву від модуля його тріщинуватості за результатами апроксимації даних 7 наукових джерел

Отже, в результаті апроксимації даних 7 джерел по зміні коефіцієнта структурного ослаблення масиву K_c залежно від модуля його тріщинуватості K_m отримана емпірична поліноміальна залежність 3-го степеня, за якої достовірність апроксимації є найбільшою і становить $R^2 = 0,891$:

$$K_c = 0,0003K_m^3 + 0,008K_m^2 - 0,1907K_m + 1. \quad (17)$$

Як видно з рисунка 3, для малотріщинуватих та розроблених порід, що складають гірський масив, коефіцієнт структурного ослаблення поступово збільшується в міру збільшення тріщинуватості. Це є не правильним, не логічним і не може бути взагалі. Однак, якщо виключити з узагальнюючих даних попередньо зазначені дві графічні залежності авторів [9] та [12], які випадають із загального характеру змін, то крива апроксимації набуває цілком логічного і закономірного виду (рис. 4). При цьому ступінь достовірності апроксимації підвищується та становить $R^2 = 0,9383$, а графічну залежність можна описати поліномом 3-го степеня виду:

$$K_c = -0,0011K_m^3 + 0,0259K_m^2 - 0,2201K_m + 1. \quad (18)$$

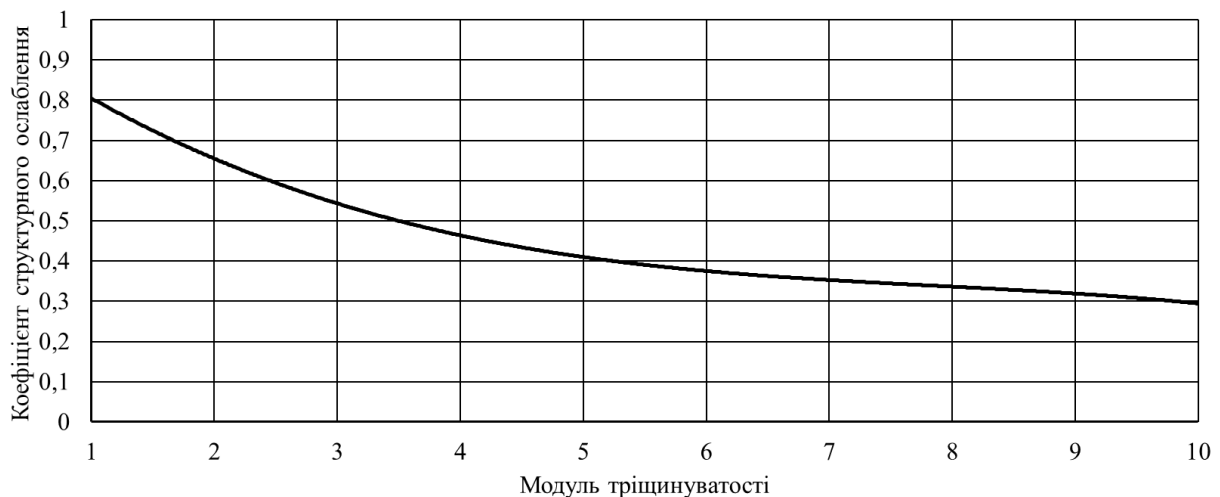


Рис. 4. Графік зміни коефіцієнта структурного ослаблення масиву від модуля тріщинуватості за результатами апроксимації даних 5 наукових джерел

Висновки та перспективи подальших досліджень. За результатом проведених наукових досліджень встановлено, що міцність порушеного скельного гірського масиву можна враховувати коефіцієнтом структурного ослаблення або закордонними його аналогами. Наведено фактори, які впливають на міцність та стійкість неоднорідного гірського масиву, і, відповідно, були враховані деякими науковцями при аналітичному обґрунтуванні під час визначення коефіцієнта структурного ослаблення.

Запропоновано усі наукові джерела, в яких приведені дані зі встановлення чисельних значень коефіцієнта структурного ослаблення гірського масиву, поділити на три групи. А саме: до першої групи рекомендовано зарахувати табличні та графічні способи визначення K_c залежно від тріщинуватості гірського масиву. Другу групу можуть становити аналітичні формули з визначення цього коефіцієнта залежно лише від значення модуля тріщинуватості гірських порід. До третьої групи належать аналітичні вирази з розрахунку коефіцієнта структурного ослаблення та їх закордонних аналогів, які крім тріщинуватості, враховують додаткові фактори, що впливають на міцність гірського масиву.

З метою узагальнення результатів, попередньо отриманих науковцями, виконано суміщення на одному графіку залежностей коефіцієнта структурного ослаблення гірського масиву від модуля тріщинуватості для першої та другої груп, оскільки вони надають однозначну оцінку коефіцієнту K_c від одного лише фактора впливу – тріщинуватості. Суміщення графічних залежностей коефіцієнта структурного ослаблення від модуля тріщинуватості показує, що характер їх зміни майже однаковий. Однак із загального характеру змін випадають дві залежності авторів [9] та [12], які для мало- та середньотріщинуватих порід показують більш інтенсивніше зниження коефіцієнта.

Виконано апроксимацію чисельних показників усіх графічних залежностей, що були представлені до аналізу, та окремо тих, які мають однаковий характер зміни коефіцієнта структурного ослаблення гірського масиву від модуля тріщинуватості. Вибір кривої апроксимації проведено для умов отримання максимального значення показника достовірності апроксимації R^2 . Отримано криві апроксимації у вигляді поліномів 3-го степеня.

Встановлено, що при апроксимації даних з усіх проаналізованих джерел (7 залежностей) по зміні коефіцієнта структурного ослаблення масиву залежно від модуля його тріщинуватості максимальна достовірність апроксимації становить $R^2 = 0,891$, а для графіків, що мають однаковий характер зміни (5 залежностей), максимальний ступінь достовірності апроксимації становить $R^2 = 0,9383$. Тобто, цілком вірогідно, що результати наукових досліджень, висвітлених в [9] та [12], отримані тільки для особливих та специфічних станів порушених гірських масивів.

Зважаючи на значну кількість додаткових факторів, що впливають на міцність порушеного скельного гірського масиву, подальші дослідження мають відбуватися в напрямку їх комплексного врахування при визначенні чисельних значень коефіцієнта структурного ослаблення.

Список використаної літератури:

1. Шашенко А.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород : монография / А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.Н. Ганеев. – Д. : Национальный горный университет, 2008. – 224 с.
2. Оценка структурного ослабления горных пород / Г.А. Катков, С.А. Толмачев, Н.Т. Бедарев, С.В. Петухов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 2.
3. Бельтек М.І. Аналіз методик визначення коефіцієнту структурного ослаблення гірського масиву / М.І. Бельтек, О.О. Фролов // Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів : тези VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, 21–22 жовтня. – Житомир : Житомирська політехніка. – 2021. – С. 8–11.
4. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В.С. Білецького. – Д. : Донбас, 2007. – Т. 2 (Л-Р). – 670 с.
5. Фролов О.О. Аналіз факторів, що впливають на міцність тріщинуватого гірського масиву / М.І. Бельтек, Н.А. Євпак, О.О. Фролов // Тези Всеукраїнської науково-практичної online-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки 16–20, 26 травня. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка». – 2022. – С. 129–130.
6. СНиП П-94-80. Подземные горные выработки / Госстрой СССР. – М. : Стройиздат, 1982. – 31 с.
7. Инструкция по проектированию крепей капитальных горных выработок для условий угольных шахт Кузбасса. – Кемерово : КузНИИ Нахтострой, 1978. – 42 с.
8. Ерофеев Л.М. Повышение надежности крепи горных выработок / Л.М. Ерофеев, Л.А. Мирошникова. – М. : Недра, 1988. – 245 с.
9. Галаев Н.З. Управление состоянием массива горных пород при подземной разработке рудных месторождений / Н.З. Галаев. – М. : Недра, 1990. – 176 с.
10. Сакураи С. Испытания основных пород в массиве и оценка результатов испытаний / С.Сакураи. – Дзауре. – 1982. – Т. 31, № 347. – С. 759–768.
11. Латышев О.Г. Оценка структурного ослабления горных пород в массиве / О.Г. Латышев, В.В. Соколов, А.А. Матвеев // Добыча, обработка и применение природного камня : сб. науч. тр. – Магнитогорск : МГТУ, 2010. – С. 279–285.
12. Инструкция по креплению горизонтальных горных выработок и их сопряжений на железорудных шахтах Урала и Казахстана. – Свердловск : ИГД МЧМ СССР, 1986. – 40 с.
13. Рекомендации по определению механических свойств трещиноватого массива. – СПб, 1992. – 14 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://mooml.com/d/direktivnye-pisma-polozheniya-rekomendatsii-idi/12472>.
14. Исследование устойчивости горных выработок глубоких горизонтов и разработка научно-технических предложений по управлению горным давлением при добыче мусковита с глубин от 200 до 400 метров // Отчет по НИР. – Л. : ГИПРОНИМЕТАЛЛУРОД, 1985. – 107 с.

15. Ким Д.Н. Влияние структуры на сдвиговую прочность массива и определение расчетных механических характеристик / Д.Н. Ким // Горное давление, сдвигание горных пород и методика маркшейдерских работ : сб. научн. тр. – Л. : ВНИМИ, 1969. – № 72. – С. 568–585.
16. Слепцов М.Н. Подземная разработка месторождений цветных и редких металлов / М.Н. Слепцов, Р.Ш. Азимов, В.Н. Мошнец. – М. : Недра, 1986. – 205 с.
17. Шашенко А. Критерий разрушения структурно неоднородных материалов / А.Шашенко, А.Ковров, Б.Ракишев // Mining of Mineral Deposits. – 2016. – № 10 (3). – С. 84–89.
18. Фролов О.О. Визначення радіуса зони вибухового розпушення тріщинуватого скельного гірського масиву при підриванні свердловинного заряду / О.О. Фролов, М.І. Бельтек // Наук. видання Державного ун-ту «Житомирська політехніка». Сер. : Технічна інженерія. – 2020. – № 2 (86). – С. 179–184.
19. Мосинец В.Н. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород / В.Н. Мосинец, А.В. Абрамов. – М. : Недра, 1982. – 248 с.
20. Шашенко О.М. Деформованість та міцність масивів гірських порід : монографія / О.М. Шашенко, О.О. Сдвижкова, С.М. Гапеев. – Д. : Національний гірничий університет, 2008. – 224 с.
21. Palmstrom A. RMI – A system for characterising rock mass strength for use in rock engineering / A.Palmstrom // JRMTT. – India. – 1996. – № 1 (2). – P. 69–108.
22. Hoek E. Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition / E.Hoek, C.T. Carranza-Torres, B.Corkum // Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium 7–10 July. – Toronto, 2002. – P. 267–273.

References:

1. Shashenko, A.N., Sdvizhkova, E.A. and Gapeev, S.N. (2008), *Deformiruemost' i prochnost' massivov gornykh porod*, monogr., NGU, D., 224 p.
2. Katkov, G.A., Tolmachev, S.A., Bedarev, N.T. and Petukhov, S.V. (2003), «Otsenka strukturnogo oslableniya gornykh porod», *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, No. 2, pp. 32–35.
3. Bel'tek, M.I. and Frolov, O.O. (2021), «Analiz metodik viznachennya koefitsientu strukturnogo oslablennya girs'kogo masivu», *Perspektivy rozvytku girnychoi' spravy ta racional'nogo vykorystannja pryrodnykh resursiv*, tezy VIII Vseukr. nauk.-prak. konf. stud., aspir. ta molodyh vchenyh, 21–22 zhovtnja, Zhytomyr's'ka politehnika, Zhytomir, pp. 8–11.
4. Bilets'kij, V.S. (ed.) (2007), *Mala girnicha entsiklopediya u 3 tomach*, Vol. 2 (L-R), 670 p.
5. Frolov, O.O., Bel'tek, M.I. and Jevpak, N.A. (2022), «Analiz faktoriv, shcho vplivayut' na mitsnist' trishchinovatogo girs'kogo masivu», tezy Vseukr. nauk.-prak. online-konf. zdobuvachyv vish. osviti i molodykh uchenykh, prisvyach. Dnyu nauky, 16-20 travnya, Zhytomir's'ka politehnika, Zhytomir, pp. 129–130.
6. SNiP II-94-80, (1982), «Podzemnye gornye vyrabotki», *Gosstroj SSSR, Stroizdat, M.*, 31 p.
7. Instruksiya pro proektirovaniyu krepei kapital'nykh gornykh vyrabotok dlya uslovii ugol'nykh shakht Kuzbassa (1978), KuzNII Nakhstostroi, Kemerovo, 42 p.
8. Erofeev, L.M. and Mirosnikova, L.A. (1988), *Povyshenie nadezhnosti krepi gornykh vyrabotok*, Nedra, M., 245 p.
9. Galaev, N.Z. (1990), *Upravlenie sostoyaniem massiva gornykh porod pri podzemnoi razrabotke rudnykh mestorozhdenii*, Nedra, M., 176 p.
10. Sakurai, S. (1982), *Ispytaniya osnovnykh porod v massive i otsenka rezul'tatov ispytanii*, Dzaure, Vol. 31, No 347, pp. 759–768.
11. Latyshev, O.G., Sokolov, V.V. and Matveev A.A. (2010), «Otsenka strukturnogo oslableniya gornykh porod v massive», *Dobycha, obrabotka i primenenie prirodnogo kamnya*, Sb. nauch. tr., MGTU, Magnitogorsk, pp. 279–285.
12. Instruksiya po kreplesnuyu gorizont'nykh gornykh vyrabotok i ikh sopryazhenii na zhelezorudnykh shakhtakh Urala i Kazakhstana (1986), IGD MChM SSSR, Sverdlovsk, 40 p.
13. Rekomendatsii po opredeleniyu mekhanicheskikh svoistv treshchinovatogo massiva, (1992), NGU, SPb, 14 p.
14. Issledovanie ustoychivosti gornykh vyrabotok glubokikh gorizontov i razrabotka nauchno-tekhnicheskikh predlozhenii po upravleniyu gornym davleniem pri dobyche muskovita s glubin ot 200 do 400 metrov, (1985), *Otchet po NIR*, GIPRONINEMETALLORUD, L., 107 p.
15. Kim, D.N. (1969), «Vliyaniye struktury na sdvigovuyu prochnost' massiva i opredelenie raschetnykh mekhanicheskikh kharakteristik», *Gornoe davlenie, sdvizhenie gornykh porod i metodika marksheiderskikh rabot*, Sb. nauchn. tr., VNIMI, L., No.72, pp.568–585.
16. Sleptsov, M.N., Azimov, R.Sh. and Moshnets, V.N. (1986), *Podzemnaya razrabotka mestorozhdenii tsvetnykh i redkikh metallov*, Nedra, M., 205 p.
17. Shashenko, A., Kovrov, A. and Rakishev, B. (2016), «Kriterii razrusheniya strukturno neodnorodnykh materialov», *Mining of Mineral Deposits*, No. 10 (3), pp. 84–89.
18. Frolov, O.O. and Bel'tek, M.I. (2020), «Vyznachennya radiusa zony vybuhovogo rozpushennja trishhynuvatogo skel'nogo girs'kogo masivu pry pidryvanni sverdlvynnogo zarjadu», *Tekhnichna inzhenerija*, Zhytomyr's'ka politehnika, Zhytomir, No. 2 (86), pp. 179–184.
19. Mosinets, V.N. and Abramov, A.V. (1982), *Razrushenie treshchinovatykh i narushennykh gornykh porod*, Nedra, M., 248 p.
20. Shashenko, O.M., Sdvizhkova, O.O. and Gapjejev, S.M. (2008), *Deformovanist' ta micnist' masyviv girs'kyh porid*, monogr., NGU, D., 224 p.
21. Palmstrom, A. (1996), «RMI – A system for characterising rock mass strength for use in rock engineering», *J. of RockMech. and Tunneling Tech.*, India, No. 1 (2), pp. 69–108.
22. Hoek, E., Carranza-Torres, C.T. and Corkum, B. (2002) «Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition», *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium*, Toronto, 7–10 July, pp. 267–273.

Фролов Олександр Олександрович – доктор технічних наук, професор кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0001-8053-2653>.

Наукові інтереси:

- буропідривні роботи на кар'єрах;
- розробка родовищ корисних копалин.

E-mail: frolov@geobud.kiev.ua.

Бельтек Микита Ігорович – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-8048-0635>.

Наукові інтереси:

- розробка родовищ корисних копалин.

E-mail: nikitabeltek@gmail.com.

Frolov O.O., Beltek M.I.

Research of the influence of the fractured rock massif on the coefficient of structural weakening

The main characteristics of rocks, which determine their strength indicators, are presented, and it is stated that, in the vast majority, the compressive strength limit is used in the calculations. Factors affecting the strength and stability of a heterogeneous rock massif are given and it is indicated that rock fracture is a determining indicator of the strength of the entire massif, which can be taken into account by the coefficient of structural weakening or its foreign analogues.

According to the results of the analysis of various approaches and methods of establishing the coefficient of structural weakening of the rocky mountain massif and their foreign counterparts, it is proposed to divide them into three groups. The first group is recommended to include tabular and graphical methods of determining the coefficient of structural weakening depending on the rock formation. The second group can be composed of analytical formulas for determining this coefficient only by the value of the fracture modulus of rocks. The third group includes expressions for calculating the coefficient of structural weakening, which, in addition to cracking, contain additional factors that affect the strength of the rock massif.

For the first two groups, a combination of all the presented graphic dependencies of the numerical values of the structural weakening coefficient on the fracture modulus of the rock massif is combined on one graph. The laws of their change were established and a general dependence was constructed as a result of their approximation, for which an analytical expression in the form of a polynomial of the 3rd degree was obtained. The selection of the approximation curve is carried out for the conditions of obtaining the maximum value of the approximation reliability indicator, which in a successful case is 0.891.

It was found that two dependencies emerge from the general nature of the changes, which, for low- and medium-cracked rocks, show a more intense decrease in the coefficient of structural weakening. After excluding them from the general analysis, the maximum reliability of the approximation was 0.9383.

Keywords: rocky mountain massif; rock; coefficient of structural attenuation; strength; modulus of cracking; strength limit; the degree of disturbance of the array.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2022