

УДК. 622.831

DOI: 10.31474/2415-7902-2021-1(6)-2(7)-123-130

О.І. Сергієнко, О.П. Когтєва, В.М. Куцерубов

ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РУЙНУЮЧИХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ ЗСУВІ З СТИСНЕННЯМ

Мета. Визначення параметрів руйнування при спільній дії нормальних і дотичних напружень на зразках пісковиків в лабораторних умовах з використанням спеціальних матриць, що моделюють різні кути нахилу зразка по відношенню до діючої сили.

Методика. На основі лабораторних досліджень руйнуючих напружень, що прикладені під різними кутами до випробувальних зразків пісковиків, при зсуві з стисненням та математичної обробки отриманих результатів були визначені необхідні фізико-механічні характеристики.

Результати. У результаті проведених лабораторних експериментів на зразках пісковиків з використанням спеціальних кутових матриць отримані залежності параметрів напружень при спільній дії зсуву з стисненням від кута нахилу зразка по відношенню до навантаження. Як показали, що при руйнуванні пісковиків стисненням із зсувом, зі збільшенням стискаючих напружень потрібно менше дотичних напружень для спричинення руйнування, і навпаки, чим менше стискаючих напружень тим більше для руйнування зразка потребується дотичних напружень. Отримані результати необхідно використовувати для визначення стійкості підготовчих виробок.

Наукова новизна. Зміна кута нахилу зразка по відношенню до навантажуючої діючої сили змінює долю участі руйнуючих напружень – перетворюючи стискаючі напруження у дотичні і навпаки. Отриманий критерій руйнування гірських порід, який складається з руйнуючих нормальних і дотичних напружень, можливо використовувати у якості критерію вивалоутворення над підготовчими виробками.

Практичне значення. Визначення параметрів руйнування при спільній дії нормальних і дотичних напружень надасть необхідні параметри для визначенні області руйнування при моделюванні напружено-деформованого стану вуглепородного масиву. Необхідність у прогнозі руйнування вуглепородного масиву потребує визначення параметрів цих напружень. Використовуючи отриманий критерій вивалоутворення над підготовчими виробками можливо прогнозувати стійкість підготовчих виробок у процесі їх експлуатації.

Ключові слова: руйнування зразка, пісковик, нормальні напруження, дотичні напруження, кут установки зразка.

Вступ. Дослідження механічних властивостей гірських порід є вкрай важливим для складання уяви про напружено-деформований стан вуглепородного масиву, що знаходиться під впливом гірничих робіт. У процесі руйнування порід під навантаженням в об'ємному напруженому стані виникає площа руйнування в якій діють нормальні і дотичні напруження. Необхідність у прогнозі руйнування вуглепородного масиву потребує визначення параметрів цих напружень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автори [1-4] вивчали механічні властивості гірських порід та їх тріщиностійкість. Так, в роботі [1] увага приділена проникності порід, спричиненою зсувом, вивченню тривимірного рельєфу тріщин. В роботі [2] вивчено характер тріщини і її поведінка під дією різних чинників. Автори у роботі [3] провели натурні дослідження на тривісній зсуві. Так, отримані результати, що бічне напруження паралельне площині напруження може значно зменшити максимальну міцність на зсув тріщини. Проведені [4] експериментальні та чисельні випробування на зсув на розтяг з використанням допоміжного пристрою. Проаналізовано деформацію та міцність на зсув пісковиків під дією розтягування. Авторами [5] наведені математичні викладки про характер подальшого напрямку росту тріщин. В роботі [6] використали неевклідову модель напружено-деформованого стану геосередовища, з необхідними математичними вираженнями. В роботі [7] змодельований поперечний зсув з подальшим розповсюдженням тріщини в середовищі.

Показник міцності на зрушення (тимчасовий опір зрушенню), також як і межа

міцності на стиск, широко застосовується для оцінки опірності гірських порід і вугілля руйнуванню, зокрема при визначенні опірності руйнуванню різальним інструментом [8].

Тимчасовий опір зрушенню зазвичай визначається при випробуванні зразків гірських порід на зріз, випробування зразків на крутіння не набуло поширення.

Для визначення тимчасового опору зрушенню випробуванням зразків на зріз із стисненням у ВВугГІ запропонований прилад (рис.1) [9], який є деякою модифікацією приладу, описаного Г.Л. Фісенко [10].

Наявність в комплекті приладу з трьох пар металевих клинів з кутами нахилу 20° , 30° і 40° і пари клинових металевих прокладок з кутом 5° дозволяє встановлювати зразок при випробуваннях під кутами від 20° до 70° з інтервалами через 5° . Для зменшення тертя при випробуваннях в приладі застосовані дві пари металевих не шліфованих плит (розміром 170×210 мм), між якими містяться по 13 катків (сталь У7) діаметром 14 мм і довжиною 140 мм. Наявність між плитами і катками додаткових плит (сталь Ст. 5), а також рясне змащення катків і плит під час випробувань зводять вплив тертя до мінімуму.

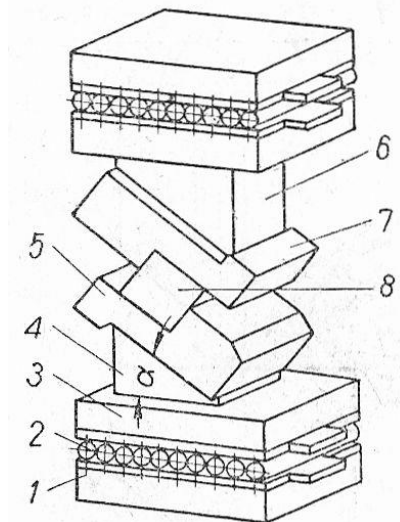


Рисунок 1 – Прилад ВВугГІ для одиночного зрізу: 1 - тонка шліфована пластинка; 2 - роликів катки; 3 - шліфована плитка; 4 і 6 - клини; 5 і 7 - г-образні плити; 8 - зразок.

Граничні нормальні σ_{np} і дотичні τ_{np} напруження, що діють в площині зсуву, обчислюють за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{np} &= \frac{P}{F} (\cos \alpha + f_k \sin \alpha) \\ \tau_{np} &= \frac{P}{F} (\sin \alpha - f_k \cos \alpha) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де P – зусилля, що розвивається пресом, кН;

F – площа поверхні сколювання зразка, м^2 ;

α – кут установки зразка;

f_k – коефіцієнт тертя кочення при наявності катків або коефіцієнт тертя спокою при відсутності катків і мастила.

Повне напруження σ_o , діє на площину зрізу, визначається формулою

$$\sigma_o = \sqrt{\sigma_{np}^2 + \tau_{np}^2} = \frac{P}{F} \sqrt{1 + f_k} . \quad (2)$$

Коефіцієнт тертя обчислюється зі співвідношення

$$f_k = \frac{f_1 + f_2}{n \cdot d} \quad (3)$$

де f_1 і f_2 – коефіцієнти тертя кочення відповідно між плитою преса і катком і між катком і приладом;

n – число катків;

d – діаметр катків, мм.

У разі, коли катки, плити і прилад зроблені зі сталі, можна прийняти $f_1 = f_2 = 0,5$, і формула для визначення коефіцієнта тертя має вигляд: $f_k = \frac{1}{n \cdot d}$. Для сухих поверхонь і тертя стали по сталі без катків коефіцієнт тертя $f_k = 0,15$.

Мета статті (постановка завдання). Визначення параметрів руйнування при спільній дії нормальних і дотичних напружень.

Методи дослідження: Лабораторні дослідження руйнуючих напружень при зсуві з стисненням.

Виклад основного матеріалу. Підготовка зразків гірської породи для лабораторних досліджень. Із зразків пісковику неправильної форми за допомогою верстата для різання каменю (рис. 2) були підготовлені зразки кубічної форми розміром $50 \times 50 \times 50$ мм.

Висушування зразків проводилося за допомогою сушильної шафи при температурі $115\text{--}120^\circ\text{C}$, а остигання зразків здійснювалося в ексикаторі (рис. 3, б).

Усі зразки були зважені на електронних вагах ФЕН ДНЕПРОВЕС® (рис. 3, в) з точністю $0,01$ гр. Виміри геометричних параметрів зразків проводилися електронним штангенциркулем (рис. 3, г) з точністю до $0,01$ мм.

У якості установки випробування використовувався гідравлічний прес П-50 (рис. 4, а), з максимальним зусиллям 50 тонн.

Для реалізації експерименту «зсув з стисненням» були виготовлені окремо металеві матриці з кутом нахилу 15° , 30° та 45° (рис. 4, б).



а)



б)

Рисунок 2 – Каменерізний верстат (а), підготовлені зразки пісковику кубічної форми (б).

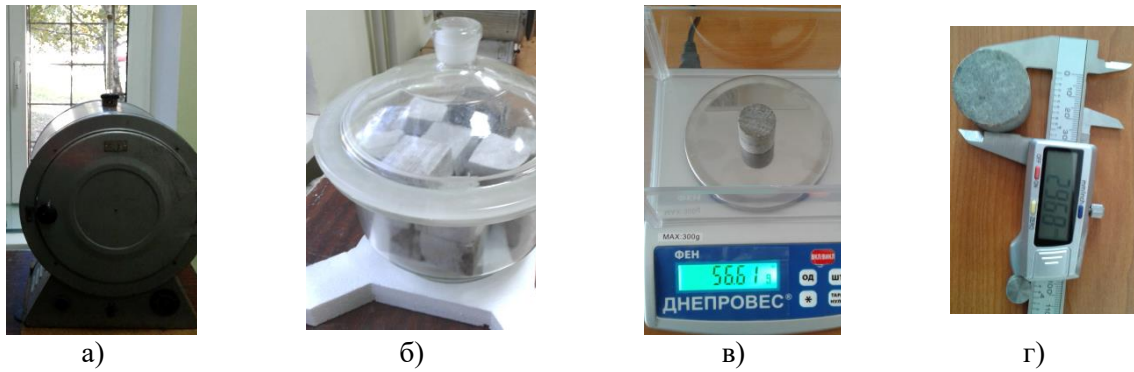


Рисунок 3 – Сушильна шафа з термометром (а), ексикатор (б), електронні ваги Фен ДНЕПРОВЕС® (в), електронний штангенциркуль (г).



Рисунок 4 – Гідравлічний прес П-50 з максимальним зусиллям 50 тонн (а), металеві матриці з кутом нахилу 15°, 30° та 45° (б).

До експерименту були вибрані три зразки пісковику: №19 з кутом нахилу матриць – 15°, №2 з кутом нахилу матриць – 30°, і №18 з кутом нахилу матриць – 45°. Виконання експерименту фіксувалося на фото і відео спостереження. Були отримані максимальні руйнуючі навантаження (табл. 2.1).

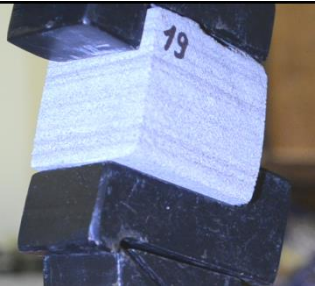
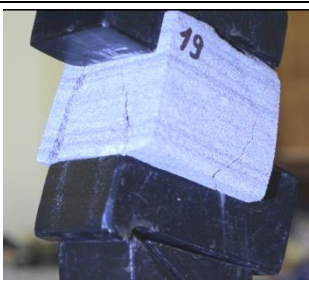
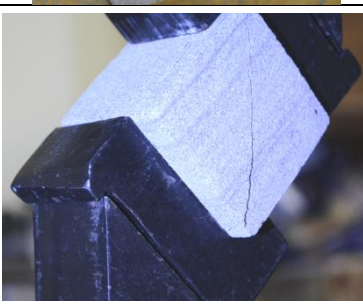
Граничні нормальні σ_{np} і дотичні τ_{np} напруження, що діють в площині зсуву, обчислюють за формулами (1). Коефіцієнт тертя спокою при відсутності катків і мастила $f_k = 0,15$.

Таблиця 1 – Результати граничних нормальних σ_{np} і дотичних τ_{np} напружень

№ зразка	Кут нахилу α , °	Максимальне навантаження Р, кН	Граничні нормальні напруження σ_{np} , МПа	Граничні дотичні напруження τ_{np} , МПа
19	15	46,65	19,76	2,24
2	30	34,99	13,85	5,45
18	45	37,16	12,14	8,97

Процес руйнування зразків пісковику при випробуванні на зсув з стисненням за різним кутом нахилу металевих матриць відображено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Руйнування зразків пісковику при випробуванні на зсув з стисненням

Кут нахилу	Зразок перед випробуванням		Зразок після випробування	
15°				
30°				
45°				

Обговорення результатів. Зі збільшенням кута нахилу зразка при випробуванні маємо тенденцію зменшення нормальних руйнуючих напружень (рис. 5).

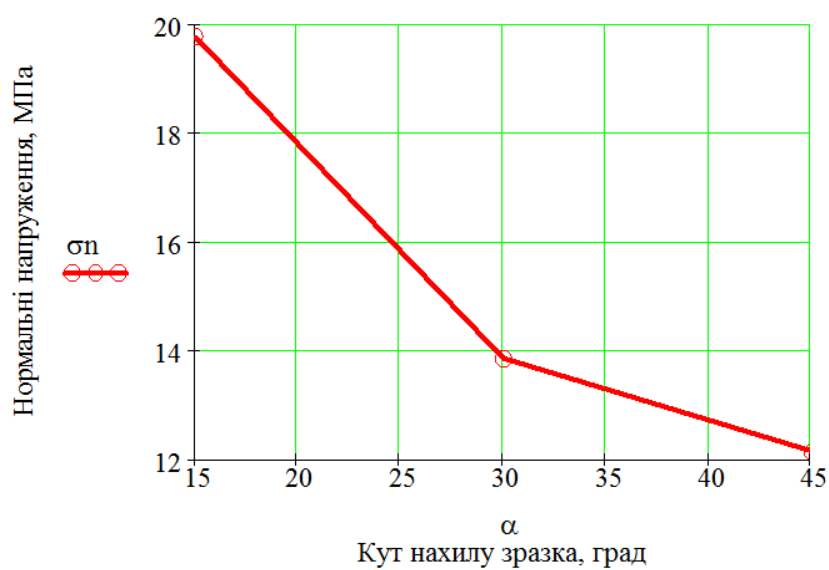


Рисунок 5 – Залежність нормальних напружень від кута нахилу зразка

Зі збільшенням кута нахилу зразка при випробуванні маємо тенденцію лінійного зростання дотичних руйнуючих напружень (рис. 6).

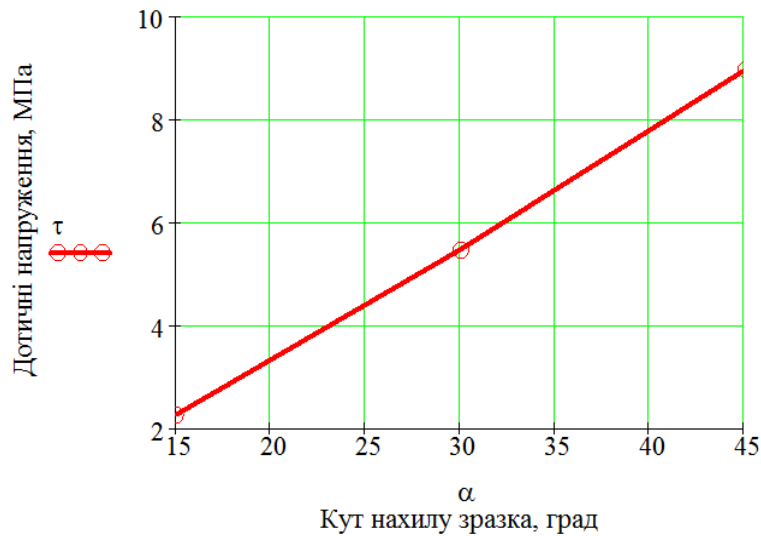


Рисунок 6 – Залежність дотичних напружень від кута нахилу зразка

От же зміна кута нахилу зразка змінює долю участі руйнуючих напружень – перетворюючи стискаючі напруження у дотичні і навпаки (рис. 7)



Рисунок 7 – Залежність дотичних від нормальних напружень

Висновки. Лабораторними дослідженнями було встановлено, що при руйнуванні пісковика стисканням із зсувом, зі збільшенням стискаючих напружень потрібно менше дотичних напружень на руйнування, і навпаки, чим менше стискаючих напружень тим більше для руйнування зразка потребується дотичних напружень.

Список літератури

1. Hongwei Zhang, Zhijun Wan, Zijun Feng, Jinwen Wu, "Shear-induced Permeability Evolution of Sandstone Fractures", Geofluids, vol. 2018, Article ID 2416481, 11 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2416481>
2. J.F. Labuz, J.J. Riedel, S.T. Dai, Shear fracture in sandstone under plane-strain compression, Engineering Fracture Mechanics, Volume 73, Issue 6, 2006, Pages 820-828, ISSN 0013-7944 <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2004.11.007>

3. Piyanat Kapang, Chaowarin Walsri, Tanapol Sriapai, Kittitep Fuenkajorn, Shear strengths of sandstone fractures under true triaxial stresses, *Journal of Structural Geology*, Volume 48, 2013, Pages 57-71, ISSN 0191-8141, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.12.007>
4. Da Huang, Tan-Tan Zhu, Experimental and numerical study on the strength and hybrid fracture of sandstone under tension-shear stress, *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 200, 2018, Pages 387-400, ISSN 0013-7944, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.08.012>
5. Асаев А.С., Иванайский А.В., & Асаева Т. А. (2020). Механика разрушения многослойных композиционных материалов с краевой трещиной продольного сдвига с вершиной на границе раздела слоев. Системные технологии, (1 (34)), 139-145.
6. Гузев Михаил Александрович, & Макаров Владимир Владимирович (2020). Реализация подхода физической мезомеханики при моделировании геосреды. Физическая мезомеханика, 23 (6), 25-32. doi: 10.24411/1683-805X-2020-16002
7. Бондарчук Д.А., Федулов Б.Н., Федоренко А.Н., & Ломакин Е.В. (2020). Анализ параметров трещиностойкости на свободной границе в слоистых композитах. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика, (4), 49-59.
8. Врублевский В.И. Сопротивление горных пород разрушению. - Киев: «Техніка», 1964. – 222 с.
9. Руппенейт К.В., Механические свойства горных пород, Углетехиздат, 1956.
10. Фисенко Г.Л., Определение сцепления и коэффициента внутреннего трения полускальных горных пород Коркинского месторождения, Сб. трудов Всесоюзного научно-исследовательского Макшейдеровского института (ВНИМИ), т. 27, Углетехиздат, 1953.

References

1. Hongwei Zhang, Zhijun Wan, Zijun Feng, Jinwen Wu, "Shear-induced Permeability Evolution of Sandstone Fractures", *Geofluids*, vol. 2018, Article ID 2416481, 11 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2416481>
2. J.F. Labuz, J.J. Riedel, S.T. Dai, Shear fracture in sandstone under plane-strain compression, *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 73, Issue 6, 2006, Pages 820-828, ISSN 0013-7944 <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2004.11.007>
3. Piyanat Kapang, Chaowarin Walsri, Tanapol Sriapai, Kittitep Fuenkajorn, Shear strengths of sandstone fractures under true triaxial stresses, *Journal of Structural Geology*, Volume 48, 2013, Pages 57-71, ISSN 0191-8141, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.12.007>
4. Da Huang, Tan-Tan Zhu, Experimental and numerical study on the strength and hybrid fracture of sandstone under tension-shear stress, *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 200, 2018, Pages 387-400, ISSN 0013-7944, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.08.012>
5. Asaev A.S., Ivanaisky A.V., & Asaeva T.A. (2020). Fracture mechanics of multilayer composite materials with an edge longitudinal shear crack with apex at the layer interface. System technologies, (1 (34)), 139-145.
6. Guzev Mikhail Alexandrovich, & Makarov Vladimir Vladimirovich (2020). Implementation of the physical mesomechanics approach for geoenvironment modeling. Physical Mesomechanics, 23 (6), 25-32. doi: 10.24411 / 1683-805X-2020-16002
7. Bondarchuk D.A., Fedulov B.N., Fedorenko A.N., & Lomakin E.V. (2020). Analysis of fracture toughness parameters at the free boundary in layered composites. Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics, (4), 49-59.
8. Vrublevsky V.I. Resistance of rocks to destruction. - Kiev: "Tekhnika", 1964. - 222 p.
9. Ruppeneyt K.V., Mechanical properties of rocks, Ugletekhizdat, 1956.
10. Fisenko G.L., Determination of adhesion and coefficient of internal friction of semi-rocky rocks of the Korkinskoye field, Sat. Proceedings of the All-Union Scientific Research MacSheider Institute (VNIIMI), vol. 27, Ugletekhizdat, 1953.

Надійшла до редакції 01.10.2021

O. Serhienko, O. Kohtieva, V. Kutserubov

LABORATORY INVESTIGATIONS OF DESTRUCTIVE STRESSES DURING COMPRESSION SHEAR

Purpose. Determination of fracture parameters under the combined action of normal and tangential stresses on sandstone samples in the laboratory using special matrices that simulate different angles of inclination of the sample in relation to the force.

Methodology. On the basis of laboratory studies of destructive stresses applied at different angles to test specimens of sandstone, the necessary physical and mechanical characteristics have been determined during shear with compression and mathematical processing of the obtained results.

Research results. As a result of laboratory experiments on sandstone samples using special angular matrices, the dependences of stress parameters under the joint action of shear with compression on the angle of inclination of the sample in relation to the load have been obtained. The results have shown, that when sandstone is destroyed by shear compression with increasing compressive stresses, less tangential stresses are required to cause failure, and conversely, the less compressive stresses, the more tangential stresses are required to break the sample. The obtained results should be used to determine the stability of the gate way.

Scientific novelty. Changing the angle of inclination of the sample in relation to the loading force changes the share of destructive stresses, turning the compressive stresses into tangential, and vice versa. The obtained criterion of destruction of rocks, which consists of destructive normal and tangential stresses, can be used as a criterion for dumping over the gate way.

Practical significance. Determining the fracture parameters under the combined action of normal and tangential stresses provides the necessary parameters to determine the fracture region in the simulation of the stress-strain state of the coal massif. The need to predict the destruction of the coal massif requires the determination of the parameters of these stresses. Using the obtained criterion of dumping over the gate way, it is possible to predict the stability of the gate way in the process of their operation.

Keywords: sample failure, sandstone, normal stresses, tangential stresses, sample installation angle.

Відомості про авторів

Сергієнко Олександр Іванович, кандидат технічних наук, доцент, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; kirova142@ukr.net

Когтєва Ольга Павлівна, старший лаборант, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; olha.kohtieva@donntu.edu.ua

Куцєрубов Валерій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; valerii.kutserubov@donntu.edu.ua

Serhienko Oleksandr, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Donetsk National Technical University; kirova142@ukr.net

Kohtieva Olha, senior laboratory assistant, Donetsk National Technical University; olha.kohtieva@donntu.edu.ua

Kutserubov Valerii, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Donetsk National Technical University; valerii.kutserubov@donntu.edu.ua