

ГМИЗА ВАЛЕРІЙ

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

<https://orcid.org/0009-0001-6629-6532>e-mail: gmyzav99@gmail.com

ВОРОБІЙОВ ВІКТОР

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

<https://orcid.org/0000-0002-3446-4714>e-mail: vvv.imit@gmail.com

ОЦІНКА ВПЛИВУ ТРІЩИНУВАТОСТІ НА ЕНЕРГІЮ РУЙНУВАННЯ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ ЗАСОБАМИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У сучасних умовах експлуатації інженерних споруд, таких як кар'єри, тунелі та підземні комунікації, особлива увага приділяється оцінці їхньої міцності та стійкості. Наявність дефектів, таких як тріщини, порожнини та включення істотно впливає на напружено-деформований стан матеріалів, знижуючи їх несучу здатність і стійкість до зовнішніх навантажень. Проведено серію дослідів в програмному забезпеченні ANSYS в яких параметри внутрішніх дефектів задавались різним чином. На основі отриманих результатів, проведено аналітичний та чисельний аналіз, отримано залежності, що мають вагоме значення для подальших досліджень.

Ключові слова: тріщинуватість, крихкі матеріали, чисельне моделювання, енергія руйнування, дефекти матеріалу, гірничі роботи.

VALERII HMYZA, VICTOR VOROBYOV

Kremenchug Mykhailo Ostrogradskyi National University

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF CRACKING ON THE FRACTURE ENERGY OF BRITTLE MATERIALS USING NUMERICAL MODELING

In the field of geomechanics and brittle material engineering, the presence of internal or surface defects plays a significant role in the structural behavior of rocks, concrete, and other hard media. Small imperfections such as artificial voids, pre-existing cracks, or internal heterogeneities often serve as weak zones where stress accumulates, leading to earlier failure. This study focuses on quantifying the effect of such defects—primarily artificial fractures and voids—on the amount of energy required for material destruction under impact loading conditions.

Numerical simulations were performed using the ANSYS Explicit Dynamics software environment to examine the behavior of specimens composed of gypsum G-5 and low-grade concrete, both with and without internal defects. The modeling replicated controlled impact scenarios, simulating the operation of a pendulum impact device and tracking parameters such as impact energy, crack development, and stress distribution. A series of configurations were tested to compare the energy required to fracture intact samples and those containing geometrically defined defects such as central voids, side cracks, inclined fractures, and edge notches.

The results indicate that the length, orientation, and spatial placement of cracks have a measurable influence on energy dissipation, the trajectory of crack propagation, and the overall failure mode. In particular, off-center or asymmetric defects were found to cause more complex fracture patterns, sometimes resulting in diagonal or secondary cracking.

This article provides a practical numerical framework to visualize and quantify how the presence of internal or surface defects affects the mechanical integrity and fracture resistance of brittle materials. The findings can serve as a foundation for further investigations aimed at improving the reliability, design, and safety assessment of geotechnical structures such as quarry benches, underground support systems, and brittle engineered components exposed to dynamic or impact loads.

Keywords: fracturing, brittle materials, numerical modeling, fracture energy, material defects, mining operations.

Стаття надійшла до редакції / Received 08.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.08.2025

Постановка проблеми

Оцінка впливу тріщинуватості на міцність гірських порід та крихких будівельних матеріалів має важливе значення у контексті забезпечення стійкості інженерних конструкцій та безпеки виконання гірничих робіт. Наявність природних або технологічно обумовлених тріщин суттєво знижує опір матеріалу зовнішньому навантаженню, що може призводити до передчасного руйнування об'єктів або їх часткової втрати несучої здатності. Особливо це актуально для таких об'єктів, як борти кар'єрів, масиви порід при підземному видобутку, або штучні споруди, які експлуатуються в складних геомеханічних умовах.

У практиці досліджень та проектування часто виникає потреба не тільки у теоретичному розумінні процесу руйнування, а й у його наочному представленні — як у вигляді візуалізації, так і в чисельному вигляді. Це дозволяє краще аналізувати вплив наявних дефектів, розробляти стратегії підсилення елементів конструкцій або прогнозувати критичний стан масиву.

На цьому фоні математичне моделювання виступає як ефективна альтернатива або доповнення до фізичних експериментів. Воно дозволяє суттєво зменшити витрати часу та ресурсів, швидко змінювати геометричні та механічні параметри моделей, моделювати складні умови навантаження, а також безпечно досліджувати сценарії, які важко або неможливо реалізувати в лабораторних умовах.

Чисельне моделювання, зокрема в середовищі ANSYS Explicit Dynamics, відкриває можливості для відтворення фізичних процесів руйнування матеріалу під ударним навантаженням. За допомогою

таких моделей можна встановити кількісну залежність між наявністю тріщин або внутрішніх порожнин і величиною енергії, необхідної для руйнування. Це забезпечує новий підхід до вивчення тріщиноватих середовищ, дозволяючи в подальшому використовувати результати дослідження для інженерної практики — від попередньої оцінки ризиків до оптимізації конструкцій з урахуванням можливих дефектів.

Аналіз досліджень та публікацій

Проблематика впливу тріщиноватості на міцнісні характеристики матеріалів активно вивчається як у геомеханіці, так і в будівельній інженерії. Багато досліджень акцентують увагу на впливі природних або штучно створених дефектів на процес деформування та подальшого руйнування порід і конструкцій.

Механічні випробування мають надзвичайно важливе значення в промисловості. Деталі машин, механізмів і споруд працюють під впливом різних видів навантажень: одні деталі піддаються постійно діючому в одному напрямку зусиллю, інші — ударам, а в третіх — зусилля більш-менш часто змінюються за величиною та напрямком. Деякі елементи машин зазнають навантажень при підвищених або знижених температурах, під дією корозії тощо.

Відповідно до цього розроблено різні методи випробувань, за допомогою яких визначають механічні властивості матеріалів, такі як міцність на розтяг і стиск, модуль Юнга, ударна в'язкість. Серед цих параметрів найменш дослідженою є ударна в'язкість — характеристика, що показує, наскільки «добре» матеріал здатен чинити опір крихкому руйнуванню [1].

Ударна в'язкість — це здатність матеріалу поглинати механічну енергію під час деформації та руйнування внаслідок ударного навантаження, або ж опір матеріалу руйнуванню при прикладанні ударного зусилля. За допомогою ударної в'язкості визначається граничне ударне навантаження, яке здатен витримати матеріал. Хоча ударна в'язкість є умовною характеристикою, що сильно залежить від розмірів зразка, форми й стану поверхні надрізу, і не може безпосередньо використовуватись у розрахунках на міцність, її практичне значення є дуже високим.

Існуючі лабораторні методи визначення ударної в'язкості відрізняються за:

- способом закріплення зразка на випробувальному стенді;
- способом прикладання навантаження — падаюча гиря, маятник, молот тощо;
- наявністю або відсутністю надрізу в місці прикладання удару.

На сьогодні найбільш поширеними способами визначення ударної в'язкості є метод Шарпі, метод Ізота та метод Гарднера.

Серед українських публікацій з проблематики тріщинуватості варто виокремити роботи [2–7], які охоплюють як бетони, так і гірські породи. У роботі [2] розглядається вплив тріщинуватості бетонів з позицій механіки руйнування. Автори аналізують, як різні типи дефектів впливають на ініціювання та поширення тріщин, зокрема в умовах навантаження. Вказується на важливість урахування тріщин при оцінці довговічності та несучої здатності конструкцій.

Дослідження [3] присвячене впливу природної тріщинуватості скельних масивів на ефективність вибухового руйнування. Автори показують, як слабкі зони змінюють розподіл хвильових навантажень і впливають на формування зон руйнування.

У дослідженні [4] розглянуто вплив низьких температур на ударну в'язкість порід. Показано зміну характеру руйнування зі зменшенням температури, зафіксовано зниження енергії поглинання удару та перехід матеріалу в більш крихкий стан. У роботі [5] аналізують похибки, що виникають при вимірюванні ударної в'язкості методом Шарпі, з урахуванням як конструктивних особливостей обладнання, так і умов проведення експериментів.

У роботах [6] і [7] досліджено зниження міцності гірських порід за наявності локальних тріщин. У [6] розглянуто деформування при об'ємному навантаженні, а в [7] — експериментальне і чисельне порівняння зразків із різними дефектами. Обидві роботи доводять важливість тріщин як чинника втрати стійкості та підвищених енерговитрат при руйнуванні.

У дослідженні [8] змодельовано механіку ударного руйнування зразка у середовищі ANSYS Explicit Dynamics, що має безпосередній зв'язок з темою цієї статті. Автори відтворили роботу маятникового копра з урахуванням геометрії реального стенду, механічних властивостей гіпсу та критеріїв руйнування.

Серед зарубіжних досліджень варто виокремити роботи [9–12], присвячені аналізу впливу тріщинуватості на механічну поведінку гірських масивів та хрупких матеріалів. У роботі [9] автори проаналізували поширення поперечних тріщин у крихких матеріалах з нелінійною пружністю, провівши комп'ютерне моделювання. У їхній моделі під час більших деформацій матеріальність різко жорсткішає, що призводить до надзвукової швидкості поширення тріщини. Автори також вивели універсальну формулу для швидкості розповсюдження тріщини, що є одним з небагатьох точних аналітичних розв'язків у механіці руйнування. У роботі [10] чисельне моделювання дозволило визначити особливості розподілу напружень у зонах ослаблення та етапи розвитку тріщин під дією навантаження. Дослідження [11] показало, що геометрія та орієнтація тріщин істотно впливають на конфігурацію зсувних деформацій у приконтурних зонах кар'єру. У публікації [12] розглянуто поширення тріщин у крихких матеріалах з урахуванням впливу локальних дефектів, анізотропії та

неоднорідностей, із порівнянням чисельних результатів із фізичними експериментами.

Наведені приклади свідчать про наукову зацікавленість у вивченні впливу тріщинуватості на міцність матеріалів. Проте більшість досліджень сконцентрована або на аналітичному моделюванні, або на лабораторних випробуваннях, без поєднання цих підходів із візуалізацією процесу руйнування. Саме тому запропоноване дослідження має прикладне значення: чисельне моделювання дозволяє не тільки кількісно оцінити вплив дефектів, а й наочно продемонструвати зміну характеру руйнування, що є корисним як у теоретичних дослідженнях, так і у практичній інженерії.

Формулювання цілей статті

Метою статті є: встановити за допомогою чисельного моделювання залежність між наявністю внутрішніх або зовнішніх дефектів у зразках крихких матеріалів та величиною енергії, необхідної для їх руйнування.

Основні задачі досліджень:

- проаналізувати, як змінюється опір матеріалу при додаванні тріщин різної форми, довжини та розташування;
- визначити конфігурації дефектів, що найбільш суттєво впливають на зниження міцності зразків.

Виклад основного матеріалу

В роботі виконано моделювання засобами Ansys експериментів по визначенню ударної в'язкості (метод Шарпі). Виконано низку чисельних дослідів на зразках, поперечний розмір яких складав 20х20 мм, а довжина – 100 мм. Характеристики матеріалу відповідали властивостям бетону (щільність матеріалу становила 2300 кг/м³, об'ємний модуль пружності дорівнював $2 \cdot 10^{10}$ Па, модуль зсуву — $1 \cdot 10^{10}$ Па, межа міцності на розтяг — 3 МПа, на зсув — 6 МПа). Для руйнування моделей використовувався клиновидний бойок, який мав початкову швидкість 4 м/с та масу 0,5 кг.

У ході дослідження було виконано серію з дев'яти чисельних експериментів, спрямованих на оцінку впливу тріщин на енерговитрати при руйнуванні зразка під дією ударного навантаження. В якості еталонного було використано зразок без дефектів. У решті варіантів змінювались геометричні параметри тріщин (довжина та кількість), а також їх просторове розташування: тріщини розміщувалися в точці прикладення удару, на відстані від неї, паралельно та перпендикулярно до напрямку навантаження. Такий підхід дозволив комплексно оцінити, як різні конфігурації дефектів впливають на механічну поведінку зразка, зокрема — на зменшення енергії, необхідної для його руйнування.

Після проведення кожного дослідів виконувалися розрахунки витраченої енергії на руйнування залежно від початкової кінетичної енергії. Результати розрахунків були занесені до таблиці-1.

Позначення на рисунках:

- 1 - бойок;
- 2 - зразок;
- 3 - задня стінка;
- 4 – опора.

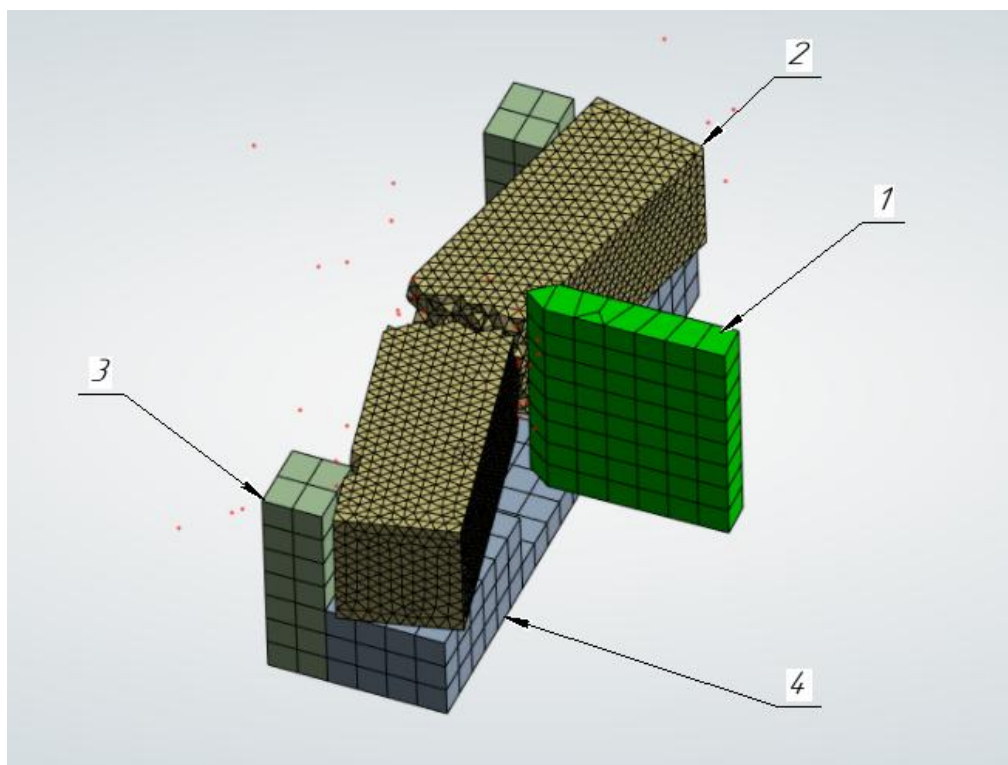


Рис. 1. Вид моделі та характер руйнування

Таблиця 1

Вплив параметрів тріщин на енергію руйнування

№	Параметри тріщини		Енергія руйнування, Дж
	довжина, мм	кількість, шт	
1	-	-	1,431
2	15	1	0,9455
3	7,5	1	1,2704
4	15	2	0,9258
5	7,5	2	1,1798
6	15	1	1,3596
7	15	2	1,1155
8	15	1	1,4817
9	15	2	1,0186

**Висновки з даного дослідження
і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

1. Проведене чисельне моделювання ударного руйнування зразків із бетону показало чіткий зв'язок між наявністю внутрішніх тріщин і величиною енергії, необхідної для руйнування. Зменшення енергії в окремих випадках досягало понад 30% у порівнянні з еталонним зразком.

2. Найбільший вплив на зниження енергії руйнування спостерігався у випадках, коли тріщина була орієнтована паралельно до прикладеної сили і мала максимальну довжину (15 мм), особливо у конфігурації з двома симетричними тріщинами — споживана енергія знизилася до 0,9258 Дж проти 1,431 Дж у зразка без дефектів.

3. Результати також продемонстрували, що зміщення тріщини відносно центру удару знижує ефективність ослаблення, що підтверджує важливість її точного розташування. Наприклад, при зміщенні тріщини на 5 мм від центру ефект ослаблення був меншим (енергія $\sim 1,36$ Дж), ніж у випадках розміщення по центру.

4. Орієнтація тріщини перпендикулярно до напрямку удару виявилася менш ефективною для зниження міцності матеріалу — у таких випадках руйнування наближалось до еталонного, а в деяких випадках навіть потребувало більшої енергії через зміну поведінки розвитку тріщини.

Отримані дані можуть бути використані у прогнозуванні стійкості інженерних конструкцій (бровки кар'єрів, підземні гірничі виробки, масиви гірських порід) та при розробці заходів щодо їх підсилення. Також можливе застосування результатів у системах оцінки залишкового ресурсу конструкцій з тріщиноватістю.

Література

1. Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Є. С. Опір матеріалів: Підручник для студентів механічних спеціальностей вищих навчальних закладів / за ред. Г. С. Писаренка. – 2-ге вид., допов. і перероб. – Київ: Вища школа, 2004. – 655 с.

2. Лучко Й.Й., Бондар Ю.І. Тріщиностійкість бетонів з позиції механіки руйнування (огляд). Науково-технічний журнал “Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві”. Львів, 2007. № 33. С. 46–53.

3. Бритвин Ю.О., Фролов О.О. Дослідження впливу тріщинуватості гірських масивів на результати руйнування скельних порід вибухом. Вісник КНУ «Криворізького національного університету». Кривий Ріг, 2016. № 39. С. 14–18.

4. Воробйов В.В., Хорошман В.А. Дослідження зміни ударної в'язкості гірських порід за низьких температур. Науково-виробничий журнал “Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва”. Кременчук. №1/2011(7). С. 22–26.

5. Воробйов В.В., Стірманов Я.М., Проценко В.Є. Оцінка похибки виміру ударної в'язкості за методом Шарпі. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Кременчук 2010. №1/2010 (60), част. 1. С. 165 – 168.

6. Ревва В.Н., Молодецький А.В. Деформування і руйнування гірських порід і вугілля при

об'ємному навантаженні. Всеукраїнський науково-технічний збірник «Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва». Донецьк, 2007. № 10. С. 81–94.

7. Струтинський В.В. Вплив тріщинуватості на міцність гірських порід: чисельне моделювання та експериментальні дослідження. Гірничий вісник. Кривий ріг. 2020. № 3. С. 45–52.

8. Гмиза В.Ю., Воробйов В.В. Моделювання визначення ударної в'язкості в ansys explicit dynamics. Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених. Кременчук. 2025. С. 93-94.

9. Guozden T. M., Jagla E. A. Supersonic Crack Propagation in a Class of Lattice Models of Mode III Brittle Fracture // Physical Review Letters. — 2005. — Vol. 95, No 22, 224302.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.224302>

10. Aitkazinova Sh., Sdyhykova O., Imansakipova N., Babets D., Klymenko D. Mathematical modeling the quarry wall stability under conditions of heavily jointed rocks // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2022. No. 6. P. 52–58.

<https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/018>

11. Kadirov V., Karimov Sh., Qushshayev U., Sharapova D. Study on the influence of the deformation zones of the quarry sides on the rock mass movement // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 304. P. 1-9.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130402002>.

12. Saik P., Rysbekov K., Kassymkanova K.-K., Lozynskiy V., Kyrgyzbayeva G., Moldabayev S., Babets D., Salkynov A. Investigation of the rock mass state in the near-wall part of the quarry and its stability management. Frontiers in Earth Science. 2024. Vol. 12. Article 1395418. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1395418>

References

1. Pysarenko H. S., Kvitka O. L., Umanskyi Ie. S. Opir materialiv: Pidruchnyk dlia studentiv mekhanichnykh spetsialnostei vyshchykh navchalnykh zakladiv / za red. H. S. Pysarenka. – 2-he vyd., dopov. i pererob. – Kyiv: Vyshcha shkola, 2004. – 655 s.

2. Luchko Y.I., Bondar Yu.I. Trishchynostiikist betoniv z pozytsii mekhaniky ruinuвання (ohliad). Naukovo-tehnichnyi zhurnal “Suchasni tekhnologii, materialy i konstruktii v budivnytstvi”. Lviv, 2007. № 33. S. 46–53.

3. Brytyn Yu.O., Frolov O.O. Doslidzhennia vplyvu trishchynuvatosti hirs'kykh masyviv na rezultaty ruinuвання skelnykh porid vybukhom. Visnyk KNU «Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu». Kryvyi Rih, 2016. № 39. S. 14–18.

4. Vorobiov V.V., Khoroshman V.A. Doslidzhennia zminy udarnoi v'iazkosti hirs'kykh porid za nyzkykh temperatur. Naukovo-vyrobnychi zhurnal “Suchasni resursoenerhozberihaiuchi tekhnologii hirn'choho vyrobnytstva”. Kremenchuk. №1/2011(7). S. 22-26.

5. Vorobiov V.V., Stirmanov Ya.M., Protsenko V.Ie. Otsinka pokhybky vymiru udarnoi v'iazkosti za metodom Sharpi. Visnyk Kremenchut'skoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohrad'skoho. Kremenchuk 2010. №1/2010 (60), chast. 1. C. 165 – 168.

6. Revva V.N., Molodetskyi A.V. Deformuvannia i ruinuвання hirs'kykh porid i vuhillia pry ob'iemnomu navantazhenni. Vseukrains'kyi naukovo-tehnichnyi zbiryk «Fizyko-tehnichni problemy hirn'choho vyrobnytstva». Donetsk, 2007. № 10. S. 81–94.

7. Strutynskiy V.V. Vplyv trishchynuvatosti na mitsnist hirs'kykh porid: chyselne modeliuvannia ta eksperymentalni doslidzhennia. Hirnychi visnyk. Kryvyi rih. 2020. № 3. S. 45–52.

8. Hmyza V.Iu., Vorobiov V.V. Modeliuvannia vyznachennia udarnoi v'iazkosti v ansys explicit dynamics. Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia studentiv, aspirantiv ta molodykh uchenykh. Kremenchuk. 2025. S. 93-94.

9. Guozden T. M., Jagla E. A. Supersonic Crack Propagation in a Class of Lattice Models of Mode III Brittle Fracture // Physical Review Letters. — 2005. — Vol. 95, No 22, 224302.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.224302>

10. Aitkazinova Sh., Sdyhykova O., Imansakipova N., Babets D., Klymenko D. Mathematical modeling the quarry wall stability under conditions of heavily jointed rocks // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2022. No. 6. P. 52–58.

<https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/018>

11. Kadirov V., Karimov Sh., Qushshayev U., Sharapova D. Study on the influence of the deformation zones of the quarry sides on the rock mass movement // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 304. P. 1-9.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130402002>.

12. Saik P., Rysbekov K., Kassymkanova K.-K., Lozynskiy V., Kyrgyzbayeva G., Moldabayev S., Babets D., Salkynov A. Investigation of the rock mass state in the near-wall part of the quarry and its stability management. Frontiers in Earth Science. 2024. Vol. 12. Article 1395418. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1395418>