

УДК 531.7:621.763

<https://doi.org/10.17721/1812-5409.2023/2.15>

Жук Я. О.<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., проф.,  
Мельниченко М. М.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., с.н.с.,  
Андрущенко В. О.<sup>1</sup>, провідний інженер,  
Кір'єв А. М.<sup>1</sup>, провідний інженер,  
Пучко Н.П.<sup>1</sup>, провідний математик,  
Водотовка М.А.<sup>1</sup>, електрослюсар

Y. O. Zhuk<sup>1</sup>, Dr. Sc., Prof.,  
M. M. Melnichenko<sup>1</sup>, PhD,  
V. A. Andruschenko<sup>1</sup>, Senior Engineer,  
A. M. Kiriev<sup>1</sup>, Senior Engineer,  
N. P. Puchko<sup>1</sup>, Lead. Math.  
M. A. Vodotovka<sup>1</sup>, Electrical fitter

### Експериментальне вивчення руйнування матеріалів після ударно- хвильового навантаження

### Experimental study of destruction of materials after shock-wave loading

<sup>1</sup> Київський національний університет імені  
Тараса Шевченка, 83000, м. Київ, пр-т.  
Глушкова 4 е,  
e-mail: realcrystallab@univ.kiev.ua

<sup>1</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv,  
83000, Kyiv, Glushkova st., 4 e,  
e-mail: realcrystallab@univ.kiev.ua

*У роботі проведені систематичні дослідження динаміки процесів руйнування та еволюції дефектів на прикладі зразків із штучного каменю. При експериментальному дослідженні зразків зі штучного каменю після ударно-хвильового навантаження спостерігається утворення радіальних тріщин, а також зародження та рух локальних тріщин в різних місцях зразків. Останнє дає можливість стверджувати про наявність складного багаторівневого руйнування зразків під дією ударно-хвильового навантаження.*

*Ключові слова: ударно-хвильовий пристрій, вибух металевої фольги, відкольне руйнування, радіальна тріщина, локальна тріщина.*

*In work, systematic studies of the dynamics of destruction processes and the evolution of defects are carried out on the example of artificial stone samples. During the experimental study of samples made of artificial stone after shock wave loading, destruction of the samples was not observed. At the same time, only the formation of radial cracks is observed. In contrast to ceramics, under the same load conditions, the rate of crack growth in artificial stone samples is, on average, 75 km/s. Software tools for 3D surface reconstruction, with high spatial resolution, were used to study the initiation and movement of cracks after shock-wave loading. 3D reconstruction of the surface makes it possible to observe and study the entire pattern of crack growth from the center to the periphery of the sample. The study and analysis of individual parts of the crack were carried out, particularly in the areas where their bifurcation and further growth occur. The nucleation and movement of local cracks in different places of the samples were also observed. The latter makes it possible to assert the existence of complex multi-level destruction of samples under the influence of shock-wave loading.*

*Key Words: shock wave device, metal foil explosion, spalling failure, radial crack, local crack.*

Статтю представив член-кореспондент НАН України, д.ф.-м.н., проф. Жук Я.О.

Розвиток авіаційно-космічної та військової техніки, енергетики та інших галузей промисловості викликає необхідність детального експериментального вивчення реакції різних конструкційних матеріалів на ударно-хвильове навантаження. Аналіз ударно-хвильових явищ у твердих тілах дозволяє встановити особливості

перебігу деформаційних процесів при високих швидкостях впливу. В даний час ще не існує єдиної теорії, яка б пояснювала ключові ефекти, що визначають пружно-пластичні властивості та динамічну міцність матеріалів при інтенсивних навантаженнях. Особливості поведінки металів та керамік в умовах динамічного та ударно-

хвильового навантаження, обумовлених розвитком дефектів, є предметом сучасних активних досліджень, які складаються з експериментального вивчення поведінки матеріалів та розробки методів широкодіапазонного моделювання.

Довгий час отримання плоских нестационарних ударних хвиль для цілей вивчення термодинамічних і механічних властивостей твердих і рідких речовин під дією імпульсного тиску проводилося традиційними методами, такими як підрив заряду хімічної вибухової речовини, розташованої на поверхні зразка, або ударом тонкої пластини, попередньо розігнаної продуктами вибуху, або електричною гарматою [1,2]. Використання цих методів вивчення механічних властивостей матеріалів в умовах великих швидкостей деформації при малих імпульсних навантаженнях обмежено або критичною товщиною вибухової речовини, або стійкістю прискорення тонких пластин.

Тому для цих цілей в даний час використовується електричний вибух металеві фольги, що розташовується на поверхні випробуваних зразків. Метод електричного вибуху передбачає можливість швидкого перетворення електромагнітної енергії на теплову енергію матеріалу фольги і забезпечує отримання згасаючих ударних хвиль з амплітудою від кількох одиниць до десятків ГПа [3-5]. При цьому експериментально доведено, що метод електричного вибуху фольги дозволяє проводити вивчення механічних властивостей при плоскому імпульсному навантаженні. Ударні хвилі, ініційовані електричним вибухом провідників у різних середовищах, знаходять широке застосування завдяки можливості керувати їх характеристиками в широких діапазонах шляхом зміни параметрів розрядного RLC-контур, розміром та матеріалом провідника, що вибухає. Дослідження динамічного руйнування твердих тіл при ударно-хвильовому навантаженні демонструють ряд ефектів [6], що суперечать класичним моделям міцності та тріщиностійкості [7]. Останнє має дуже важливе значення, оскільки динамічне руйнування є визначальним при пробиванні броні та дробленні снарядів. При цьому складність динамічних досліджень полягає в необхідності проводити реєстрацію параметрів процесу в мікро секундному часовому діапазоні, а для підвищення інформативності необхідно оцінювати поведінку матеріалів при різних видах навантаження та руйнування: у плоских хвилях

навантаження, при розвитку одиночної тріщини та при пробитті перешкоди.

Специфіка ударно-хвильових впливів полягає в тому, що через малу тривалість часу навантаження практично відсутній взаємний вплив окремих ділянок навантажуваного тіла, що містять будь-які великі дефекти, і відповідно їх внесок у процес руйнування. Крім того, при цьому розвиваються екстремально високі швидкості деформування, відбувається розігрів речовини, змінюється сам механізм пластичної деформації (наприклад, у металах відбувається активування додаткових площин ковзання, збільшується внесок двійникування в деформацію навіть для тих матеріалів, де у звичайних умовах навантаження деформаційні двійники не утворюються).

Актуальність досліджень у цій галузі обумовлена також необхідністю розробки математичних моделей, здатних описати зв'язок пружно-пластичної поведінки та руйнування матеріалів з кінетикою накопичення дефектів. При цьому подальші дослідження змін міцності на мікрорівні та механізмів пластичного деформування сприятимуть конструюванню нових високоміцних матеріалів та вдосконаленню технології їх обробки.

### Зразки і методи вимірів

Головна мета роботи полягала у розробці методики експрес-діагностики для експериментального визначення міцнісних властивостей керамічних, скляних і полімерних матеріалів при їх ударно-хвильовому руйнуванні.

З цією метою авторами був розроблений ударно-хвильовий експериментальний пристрій, який ґрунтується на використанні специфіки ударно-хвильових впливів. Експериментальний пристрій розроблено для тестування динамічної міцності таких матеріалів як кераміка, скло, та оргскло різної товщини. Ударно-хвильовий пристрій дозволяє генерувати пружний імпульс стиснення до 5 ГПа протягом менше 0,4 мікросекунди на площі в кілька десятків квадратних міліметрів. При цьому тонка металева фольга затискається між двома гладкими пластинами (наприклад, зі скла) і вибухає (розплавляється та випаровується) від розряду накопичувального конденсатора. Хвиля стиску доходить до верхньої вільної межі випробуваної пластини і, відбиваючись від неї, формує хвилю руйнування, яка забезпечує конусне відкольне руйнування. За допомогою такого пристрою можливо досить точно

визначати величину динамічної міцності, по початку відкольного руйнування, і, таким чином, модифікувати технологічний процес до отримання необхідних параметрів міцності, або провести порівняння і відбір матеріалів для конкретних цілей.

### Результати та їхнє обговорення

У роботі були проведені систематичні дослідження динаміки процесів руйнування для зразків з штучного каменю, виготовленого за заводськими вимогами. Штучний камінь створюють з крихти природного каменю і в першу чергу – кварциту. Характеристики міцності кварциту дуже високі. Штучний камінь перевершує не тільки мрамур, а й граніт за всіма показниками міцності: на удар, на вигин, на стиск та на стиск при охолодженні. Розмір зразка становив 60 мм на 60 мм при товщині 3 мм. При

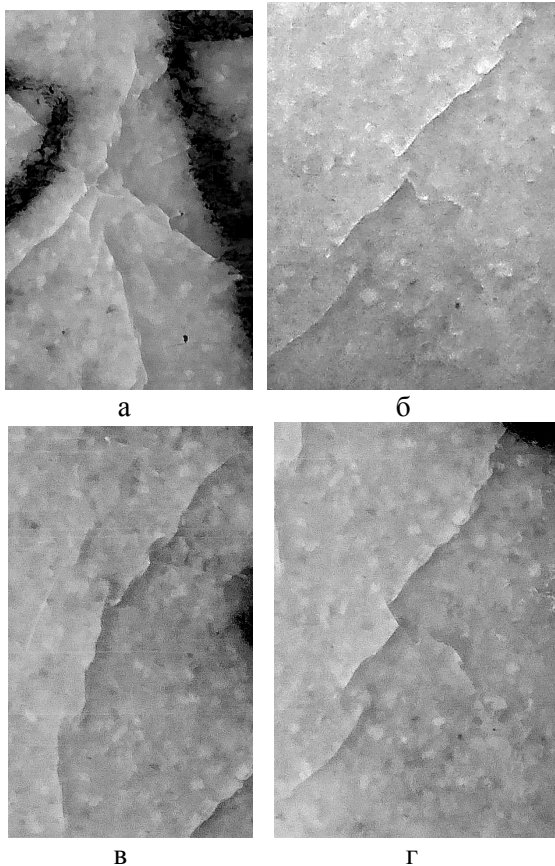


Рис. 1 Зображення тріщин після ударно-хвильового навантаження: а- центральна частина, б та в-середня частина, г-периферія зразка (збільшення у 5 разів).

експериментальному дослідженні зразків зі штучного каменю після ударно-хвильового навантаження не спостерігається руйнування зразків. При цьому спостерігається лише утворення радіальних тріщин.

В роботі також було проведено вивчення та аналіз окремих частин тріщин зокрема на ділянках де відбувається їх роздвоєння та подальший ріст рис. 1.

Дуже важливим є можливість вивчати ріст тріщини з роздвоєнням рис. 2а,б. Після роздвоєння тріщини енергії для росту вистачає як правило лише на одну гілку роздвоєної тріщини рис. 2а.

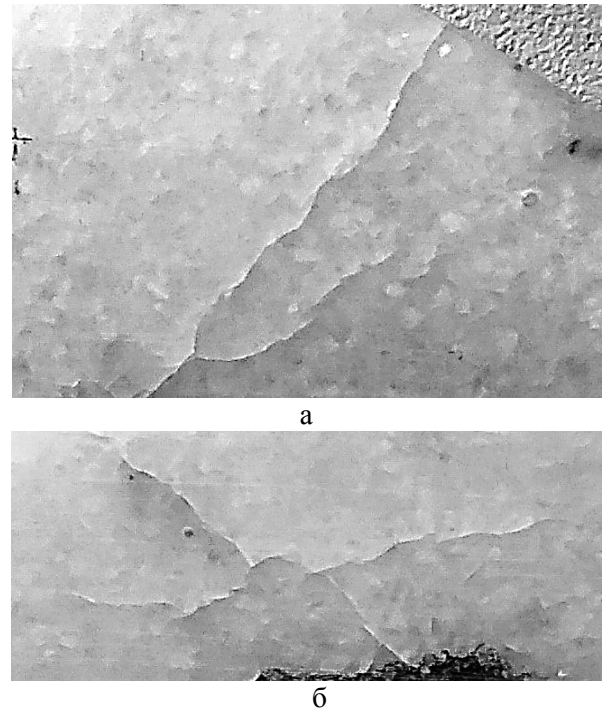


Рис. 2 Зображення окремих частин тріщини на ділянках де відбувається їх роздвоєння - а та подальший ріст - б (збільшення у 5 разів).

Отримані результати по дослідженню утворення та руху тріщин після ударно-хвильового навантаження зразків штучного каменю дають можливість провести оцінку швидкості росту тріщин у таких зразках. На відміну від кераміки при одних і тих же умовах навантаження швидкість росту тріщин у зразках штучного каменю в середньому дорівнює 75 км/с, що майже у два рази менше ніж у кераміці.

Для прецизійного вивчення зародження та руху тріщин після ударно-хвильового навантаження в роботі використовували програмні засоби для 3D реконструкції поверхні з високою просторовою роздільною здатністю. На рис. 3 продемонстровано отриману 3D поверхню периферійної частини зразка штучного каменю. 3D реконструкція поверхні дає можливість спостерігати та вивчати всю картину росту тріщин від центру до периферії зразка. Аналіз рис. 3 вказує на можливість вивчати в деталях рух тріщин до краю зразків під дією

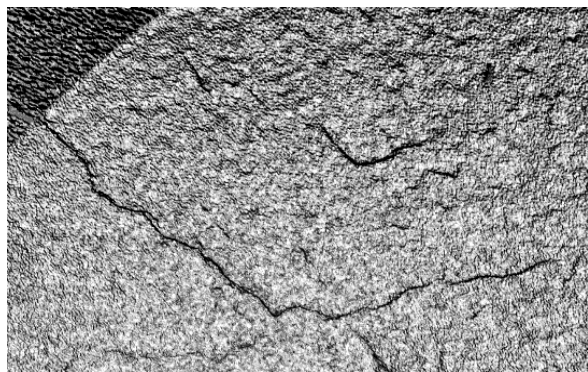


Рис. 3 3D зображення поверхні на периферії зразка із штучного каменю.

високошвидкісного ударного навантаження в

незалежності від кутів освітлення необхідних при металографічних дослідженнях. При цьому спостерігається також зародження та рух локальних тріщин в різних місцях зразків. Останнє дає можливість стверджувати про наявність складного багаторівневого руйнування зразків під дією ударно-хвильового навантаження.

Всі одержані експериментальні результати є необхідними і дуже важливими для математичного моделювання процесів тріщиноутворення з метою одержання нових матеріалів з високими значеннями міцності необхідними для протидії високошвидкісним ударним навантаженням.

### Список використаних джерел

### References

1. Zirnheld J.L. Electric explosion of aluminum metallized film / J.L. Zirnheld, S. Olabisi, K. Burke, T.M. Disanto, H.L. Moore, and H. Singh // IEEE Transactions on plasma science. – 2009. – vol. 37(12). – P. 2378–2384.
2. Saxena A.K. Shock experiments and numerical simulations on low energy portable electrically exploding foil accelerators / A.K. Saxena, T.C. Kaushik, S.C. Gupta // Review of scientific instruments. – 2010. – vol. 81(3). – 033508.
3. Muffoletto D.P. Effects of Inductance on the Pressure Produced from Exploding Aluminum Metallized Capacitor Grade Polypropylene Films / D.P. Muffoletto, K.M. Burke, J.L. Zirnheld, and S.O. Olabisi // IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences. – 2018. – vol. 2(6). – P. 624–628.
4. Surkaev A.L. Millisecond Electric Explosion of Metal Conductors / A.L. Surkaev, V.I. Usachev, and M.M. Kumysh // Technical Physics Letters. – 2011. – vol. 37(12). – P. 1135–1138.
5. Grigor'ev A.N. Pressure Generated by the Electric Explosion of Metal Foils / A.N. Grigor'ev A.V. Pavlenko // Technical Physics Letters. – 2009. – vol. 35(9). – P. 865–868.
6. Kanel G.I. Shock-Wave Phenomena and the Properties of Condensed Matter / G.L. Kanel, S.V. Razorenov, V.E. Fortov // Springer New York. – 2013. – P. 322.
7. Kundu T. Fundamentals of fracture mechanics / T. Kundu // CRC Press. – 2008. – P. 305.
1. ZIRNHELD J.L., OLABISI S., BURKE K., DISANTO T.M., MOORE H.L. JR., AND SINGH H. (2009) *Electric explosion of aluminum metallized film*. IEEE Transactions on plasma science. 37(12). p. 2378–2384.
2. SAXENA A.K., KAUSHIK T.C., GUPTA S.C. (2010) *Shock experiments and numerical simulations on low energy portable electrically exploding foil accelerators*. Review of scientific instruments. 81(3). 033508.
3. MUFFOLETTO D.P., BURKE K.M., ZIRNHELD J.L., AND OLABISI S.O. (2018) *Effects of Inductance on the Pressure Produced from Exploding Aluminum Metallized Capacitor Grade Polypropylene Films*. IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences. 2(6). p. 624–628.
4. SURKAEV A.L., USACHEV V.I., AND KUMYSH M.M. (2011) *Millisecond Electric Explosion of Metal Conductors*. Technical Physics Letters. 37(12). p. 1135–1138.
5. GRIGOR'EV A.N., PAVLENKO A.V. (2009) *Pressure Generated by the Electric Explosion of Metal Foils*. Technical Physics Letters. 35(9). p. 865–868.
6. KANEL G.I., RAZORENOV S.V., FORTOV V.E. (2013) *Shock-Wave Phenomena and the Properties of Condensed Matter*. Springer New York. p. 322.
7. KUNDU T. (2008) *Fundamentals of fracture mechanics*. CRC Press. p. 305.

Надійшла до редколегії 25.06.23