

УДК 531.7

DOI: <https://doi.org/10.17721/1812-5409.2025/2.18>

Микола МЕЛЬНИЧЕНКО<sup>1</sup>, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.  
ORCID ID: 0000-0002-3473-0701  
e-mail: mykola.melnychenko@knu.ua

Леонід ЯРОВОЙ<sup>1</sup>, канд. техн. наук.  
ORCID ID: 0000-0001-6374-4160  
e-mail: yarovoi@univ.kiev.ua

Наталія ПУЧКО<sup>1</sup>, провід. інж.  
e-mail: natalia.puchko@knu.ua

Михайло ВОДОТОВКА<sup>1</sup>, електрослюсар  
e-mail: nanocrystallab@univ.kiev.ua

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

## МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОНИКНЕННЯ ВИСОКОШВИДКІСНИХ УДАРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У БРОНЕМАТЕРІАЛАХ

*Розроблено та створено експериментальний комплекс настільного розгінного стенду, у якому куля діаметром 8 мм зі сталі ШХ15 прискорюється енергією газів монтажного патрону під час руху каналом завдовжки 570 мм з керуваною швидкістю від 200 до 1500 м/с та різними кутами атаки від 45 до 90°. Проведено апробацію розгінного стенду. Встановлено, що після обстрілу зі швидкістю 200 м/с та 600 м/с для різних зразків бронематеріалів з'являється пластична вм'ятинка різного вигляду та різної глибини. Водночас у залишковій вм'ятині виявлено залишки процесу плавлення та витискування бронематеріалу із вм'ятини. У разі обстрілу багатошарового бронепакету кулею зі швидкістю 600 м/с не відбувається деформації кулі. Для оцінки фізико-механічних характеристик досліджуваного багатошарового бронематеріалу виконано серію вимірювань мікротвердості біля місць взаємодії на поверхні зразка. Тестування на мікротвердість проведено статичним методом Віккерса (ПМТ-3). Встановлено, що значення мікротвердості біля залишкової пластичної вм'ятини зазнає істотних змін. Спочатку значення мікротвердості зменшується на  $\approx 0,4$  ГПа і, залежно від того, уздовж яких взаємно перпендикулярних ліній відбувалося профілювання поверхні, дорівнює 0,026 ГПа та 0,07 ГПа. Потім значення мікротвердості збільшується до практично середніх значень 0,35 ГПа. Отже, зміна значення мікротвердості під час профілювання поверхні вказує на зміни фізико-механічних властивостей матеріалу в невеликій зоні поблизу місця зіткнення. Проте в цих зонах твердість матеріалу суттєво зменшується і за повторного обстрілу можливе повне пробиття багатошарового бронепакету.*

**Ключові слова:** бронематеріал, ударно-хвильове навантаження, бронепробиття, мікротвердість, картографування мікротвердості.

Класифікація відповідно до AMS 2020: 74E30, 74E15.

### Вступ

Для виготовлення сучасних багатокомпонентних бронезилетів використовуються різноманітні комбінації спеціальних захисних матеріалів, таких як Kevlar®, Twaron®, Artec®, Nomex®, Kermel®, Teijinconex®, Kynol®, а також надвисокомолекулярний поліетилен (Dyneema®, Spectra®, Zylon®, M5® та ін.), виготовлені у формі волокон і тканин (Abtew et al., 2019). Для виробництва бронепанелей завдяки високій жорсткості і низькій щільності застосовують композиційні та різні види керамічних матеріалів, таких як оксид, карбід і нітрид бору. Водночас пластини із броневих сталей і сплавів титану також не втрачають актуальності для виготовлення броні. Нині традиційно використовують високолеговані броньові сталі з такими високими характеристиками, як твердість, міцність, відносне видовження, модуль пружності, температура плавлення. Крім того, розробники броні пропонують дисперсійно зміцнені сплави на основі алюмінію, міді, більш дорогих і легких металів, таких як берилій і титан, або виготовлених на їхній основі композиційних систем. Отже, натеper вченими розроблено низку методів одержання бронестійких матеріалів і композицій (Crouch, 2019). Проте оскільки бронезилет має забезпечувати ефективний балістичний захист життєво важливих органів на рівні не менше 90 %, то для забезпечення такого високого рівня захисту бронезилети мають бути ретельно перевірені й оцінені за відповідними вимогами та критеріями (Yaneva, 2020; Tahenti, Coghe, & Nasri, 2020).

Сучасне застосування бронематеріалів вимагає підвищеної стійкості щодо дії високошвидкісного ударного навантаження, зниження їхньої питомої ваги, собівартості та спрощення технології виготовлення. Це можливо за умови науково-обґрунтованого підходу до їхньої розробки та виготовлення, що передбачає з'ясування механізмів руйнування бронематеріалів у разі дії на них високошвидкісного навантаження й оптимізації структурних особливостей відповідно до одержаних результатів.

Варто зауважити, що випробування зразків одержаної броні на балістичну стійкість проходять переважно лише на полігонах і зазвичай за неконтрольованих швидкостей і кутів атаки вражаючих елементів (Yaneva, 2020; Yun-ho, Jung-hoon, & Jong-Hwan, 2018). Цей шлях є досить витратним і малоінформативним. У зв'язку із цим виникає необхідність у розвитку нових підходів до змісту самих досліджень, що ґрунтуються на систематичних експериментальних дослідженнях динаміки процесів проникнення високошвидкісних ударних елементів у перепони з різних балістичностійких матеріалів.

У пропонованій роботі представлено методику експериментального моделювання проникнення високошвидкісних ударних елементів у бронематеріалах. Для ударних випробувань передбачається використовувати розроблений настільний розгінний стенд, що дає можливість формувати ударні хвилі в широкому діапазоні тисків, які змінюють структуру матеріалу перешкоди. Використання стенду для ударних випробувань і моделювання динаміки процесів проникнення

© Мельниченко Микола, Яровой Леонід, Пучко Наталія, Водотовка Михайло, 2025

високошвидкісних ударних елементів у перепони з різних бронестійких матеріалів допоможе розробити методичні особливості визначення динамічної стійкості бронематеріалів у великому діапазоні швидкостей і кутів атаки ударного навантаження. На основі отриманих параметрів стану бронематеріалів у зоні перебігу процесів руйнування будуть можливими атестація та розроблення рекомендацій щодо доцільності їхнього використання.

**1. Основні означення та результати**

Для постановки методики експериментального моделювання проникнення високошвидкісних ударних елементів у бронематеріалах у роботі було розроблено конструкцію та створено лабораторний експериментальний комплекс настільного розгінного ственду, у якому куля діаметром 8 мм зі сталі ШХ15 прискорюється енергією газів монтажного патрону під час руху каналом завдовжки 570 мм з керованою швидкістю від 200 до 1500 м/с та різними кутами атаки – від 45 до 90° (рис. 1).

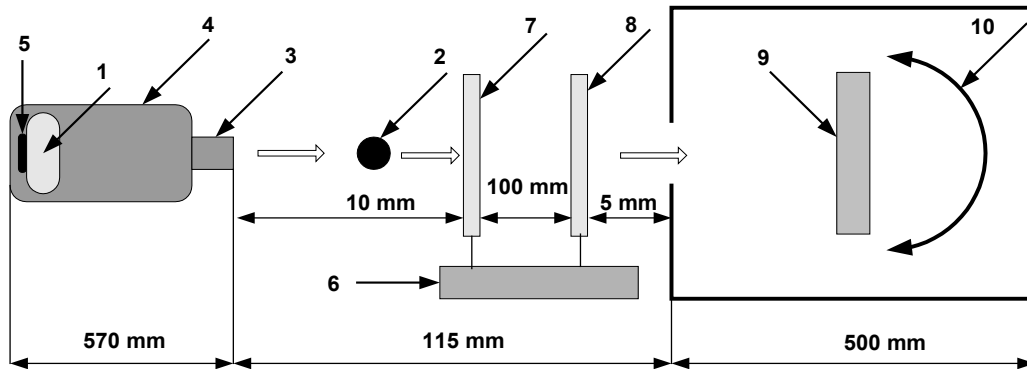


Рис. 1. Схематичне зображення настільного розгінного ственду

На рис. 1 наведено схематичне зображення настільного розгінного ственду. У розглянутій конструкції запропоновано використовувати енергію газів змінного монтажного набоя (1). Це дає можливість для розгону сталевих сферичних ударників діаметром 8 мм та масою 2,2 г (2) від 200 м/с до 1500 м/с. Фіксована довжина ствола (570 мм) забезпечує компактність розгінного блоку і всього ственду загалом. Ствол (3) міститься в захисній сталевій оболонці (4). Монтажий набій має електричний підпал (5), що дає змогу використовувати дистанційний пуск із сусіднього приміщення. Вимірювання початкової швидкості кулі здійснюється хронометром (6) за допомогою стартового (7) та кінцевого (8) тригерів із похибкою не більше 10 м/с. Мішень із бронематеріалу (9) встановлюємо поблизу хронографа на відстані 250–400 мм під різними кутами атаки (10). За експериментального моделювання проникнення кулі всі параметри ственду залишаються сталими. Змінним параметром є лише швидкість кулі. Для подальшого використання настільного розгінного ственду можна застосовувати стволи різного діаметру й ударні елементи не тільки у вигляді куль, а й також у вигляді стрижнів з різними наконечниками.

Варто зауважити, що втрата стійкості прямолінійного руху ударних елементів без стабілізуючого обертання навколо осі відбувається на великих відстанях від дульного зрізу, тому в запропонованому розгінному ственді вони мінімальні. Невеликі розміри ственду дають змогу встановлювати його в будь-яких приміщеннях і лабораторіях. Розроблений настільний розгінний ственд має можливість встановлення як у горизонтальному, так і у вертикальному положенні.

Для апробації розгінного ственду в роботі використовували зразки бронематеріалів зі сталі та багатшаровий бронематеріал із заліза та міді. Після обстрілу зі швидкістю 200 м/с та 600 м/с різних зразків бронематеріалів не спостерігаємо деформації кулі, а на поверхні з'являється пластична вм'ятини різного вигляду та різної глибини (рис. 2). Під час пострілу в один із досліджуваних бронематеріалів зі сталі (рис. 2 б) в залишковій вм'ятині спостерігаємо залишки процесу плавлення та витискування бронематеріалу із вм'ятини. Для іншого зразка бронематеріалу (рис. 2 в) такі процеси не виникають. Необхідно підкреслити, що після обстрілу багатшарового бронепакету також не спостерігаємо процесу плавлення (рис. 2 г). На рис. 2 д наведено зображення залишкової вм'ятини за невеликого оптичного збільшення у п'ять разів. При цьому відбувається багаторазове послідовне витискування бронематеріалу.

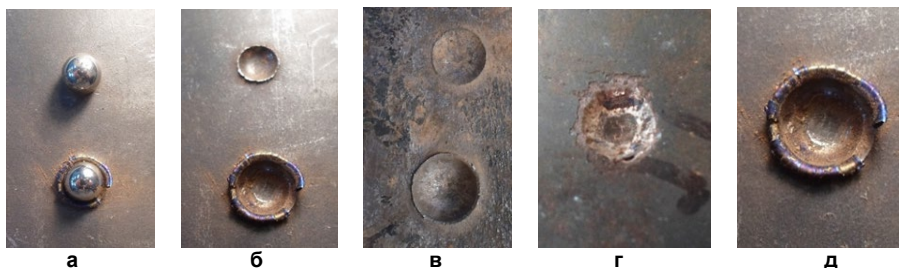


Рис. 2. Загальний вигляд поверхні після взаємодії кулі зі сталевими бронематеріалами (а, б, в, д) та сталєво-мідним багатшаровим бронематеріалом (г)

У роботі було проведено оцінку фізико-механічних характеристик досліджуваного багатшарового бронематеріалу. Для картографування механічних властивостей після взаємодії кулі з поверхнею виконано серію вимірювань мікротвердості статичним методом Віккерса (ПМТ-3).

Графіки зміни величини мікротвердості за зміни місця інденування побудовані на основі середніх значень мікротвердості, отриманих із 10 послідовних вдавнень з інтервалами 50 мкм за навантаження 200 г. На рис. 3 представлено

зміну значення мікротвердості вздовж двох взаємно перпендикулярних ліній не враженої поверхні та біля залишкової пластичної вм'ятини від кулі з початковою швидкістю 600 м/с. Значення мікротвердості на не враженій поверхні суттєво не змінюється (рис. 3 а).

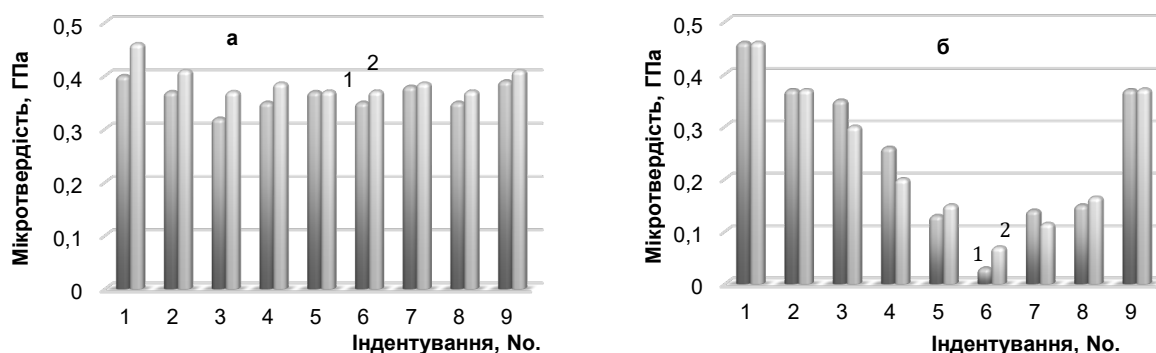


Рис. 3. Зміна значення мікротвердості вздовж двох взаємно перпендикулярних ліній (1, 2) на поверхні (а) та біля залишкової пластичної вм'ятини (б) багатошарового бронематеріалу

Із рис. 3 б видно, що значення мікротвердості біля залишкової пластичної вм'ятини зазнає значних змін. Спочатку значення мікротвердості зменшується на  $\approx 0,4$  ГПа і, залежно від уздовж яких заданих ліній відбувалося профілювання поверхні, дорівнює 0,026 ГПа (рис. 3 б, 1) та 0,07 ГПа (рис. 3 б, 2). Потім значення мікротвердості збільшується до практично середніх значень 0,35 ГПа однаково за профілювання поверхні вздовж заданих ліній. Отже, зміна значення мікротвердості при профілюванні поверхні вказує на зміни фізико-механічних властивостей матеріалу в невеликій зоні поблизу місця зіткнення. Проте в цих зонах твердість матеріалу суттєво зменшується і за повторного обстрілу можливе повне пробиття багатошарового бронепакету.

#### Дискусія і висновки

Розроблено конструкцію та створено експериментальний комплекс настільного розгінного стенду, у якому куля діаметром 8 мм із сталі ШХ15 прискорюється енергією газів монтажного патрону під час руху каналом завдовжки 570 мм з керованою швидкістю від 200 до 1500 м/с та різними кутами атаки від 45 до 90°. Встановлено, що після обстрілу зі швидкістю 200 м/с та 600 м/с для різних зразків бронематеріалів з'являється пластична вм'ятини різного вигляду та різної глибини. Водночас у залишковій вм'ятині спостерігаємо залишки процесу плавлення та витискування бронематеріалу із вм'ятини. У разі обстрілу багатошарового бронепакету кулею зі швидкістю 600 м/с не відбувається деформації кулі. У роботі було проведено оцінку фізико-механічних характеристик досліджуваного багатошарового бронематеріалу. Для картографування механічних властивостей після високошвидкісної взаємодії кулі з поверхнею багатошарового бронематеріалу було виконано серію вимірювань мікротвердості біля місць взаємодії на поверхні зразка. Тестування на мікротвердість проводили статичним методом Віккерса (ПМТ-3). Графіки залежності величини мікротвердості у разі зміни місця індентування побудовані на основі середніх значень мікротвердості, отриманих із 10 послідовних вдавнень з інтервалами 50 мкм за навантаження 200 г. Встановлено, що значення мікротвердості біля залишкової пластичної вм'ятини зазнає істотних змін. Спочатку значення мікротвердості зменшується на  $\approx 0,4$  ГПа і, залежно від уздовж яких взаємно перпендикулярних ліній відбувалося профілювання поверхні, дорівнює 0,026 ГПа та 0,07 ГПа. Потім значення мікротвердості збільшується до практично середніх значень 0,35 ГПа. Отже, зміна значення мікротвердості за профілювання поверхні вказує на зміни фізико-механічних властивостей матеріалу в невеликій зоні поблизу місця зіткнення. Проте в цих зонах твердість матеріалу суттєво зменшується і за повторного обстрілу можливе повне пробиття багатошарового бронепакету.

**Внесок авторів:** Микола Мельниченко – концептуалізація, методика, емпіричне дослідження; Леонід Яровой – збір і перевірка емпіричних даних; Наталя Пучко – аналіз джерел, підготовка огляду літератури; Михайло Водотовка – емпіричне дослідження.

**Джерела фінансування.** Дослідження було виконано за фінансової підтримки МОН України в межах виконання проекту "Методика дослідження динамічної стійкості та процесів руйнування бронематеріалів під дією ударного навантаження".

#### Список використаних джерел

- Abtew, M., Boussu, F., Bruniauxab, P., Loghin, C., & Cristian, I. (2019). Engineering of 3D warp interlock p-aramid fabric structure and its energy absorption capabilities against ballistic impact for body armour applications. *Composite Structures*, 225, 111179.
- Crouch, I. (2019). Body armour – New materials, new systems. *Defence Technology*, 15(3), 241–253.
- Tahenti, B., Coghe, F., & Nasri, R. (2020). Ballistic Limit Estimation Approaches for Ballistic Resistance Assessment. *Defence Science Journal*, 70(1), 82–89. <https://doi.org/10.14429/dsj.70.14122>
- Yaneva, S. (2020). Ballistic resistance of bulletproof vests level IIIA. Development of testing methodology. *MATEC Web Conference*, 317, 06003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202031706003>
- Yun-ho, S., Jung-hoon, C., & Jong-Hwan, K. (2018). Test and estimation of ballistic armor performance for recent naval ship structural materials. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 10, 762–781.

#### References

- Abtew, M., Boussu, F., Bruniauxab, P., Loghin, C., & Cristian, I. (2019). Engineering of 3D warp interlock p-aramid fabric structure and its energy absorption capabilities against ballistic impact for body armour applications. *Composite Structures*, 225, 111179.
- Crouch, I. (2019). Body armour – New materials, new systems. *Defence Technology*, 15(3), 241–253.

- Tahenti, B., Coghe, F., & Nasri, R. (2020). Ballistic Limit Estimation Approaches for Ballistic Resistance Assessment. *Defence Science Journal*, 70(1), 82–89. <https://doi.org/10.14429/dsj.70.14122>
- Yaneva, S. (2020). Ballistic resistance of bulletproof vests level IIIA. Development of testing methodology. *MATEC Web Conference*, 317, 06003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202031706003>
- Yun-ho, S., Jung-hoon, C., & Jong-Hwan, K. (2018). Test and estimation of ballistic armor performance for recent naval ship structural materials. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 10, 762–781.

Отримано редакцією журналу / Received: 25.06.25  
Прорецензовано / Revised: 06.10.25  
Схвалено до друку / Accepted: 10.10.25

Mykola MELNICHENKO<sup>1</sup>, PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher  
ORCID ID: 0000-0002-3473-0701  
e-mail: mykola.melnychenko@knu.ua

Leonid YAROVOI<sup>1</sup>, PhD (Engin.)  
ORCID ID: 0000-0001-6374-4160  
e-mail: yarovoi@univ.kiev.ua

Natalia PUCHKO<sup>1</sup>, Leading Engineer  
e-mail: natalia.puchko@knu.ua

Mykhailo VODOTOVKA<sup>1</sup>, Electrical Mechanic  
e-mail: nanocrystallab@univ.kiev.ua

<sup>1</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

### METHOD OF EXPERIMENTAL MODELING OF PENETRATION OF HIGH-VELOCITY IMPACT ELEMENTS IN ARMOR MATERIALS

*The work developed and created an experimental complex of a desktop acceleration stand in which a ball with a diameter of 8 mm made of ШХ15 steel is accelerated by the energy of gases from a mounting cartridge while moving along a channel 570 mm long with a controlled speed from 200 to 1500 m/s and at various angles of attack from 45 to 90°. The acceleration stand was tested. It was found that after firing at speeds of 200 m/s and 600 m/s, various types of armor materials exhibited plastic dents of various shapes and depths. At the same time, the residual dent shows traces of the process of melting and extrusion of the armor material from the dent. When firing a multi-layer armor package with a bullet at a speed of 600 m/s, no deformation of the bullet is observed. To evaluate the physical and mechanical characteristics of the multilayer armor material under study, a series of microhardness measurements was performed at the points of interaction on the sample surface. Microhardness testing was performed using the Vickers static method (PMT-3). It was found that the microhardness value near the residual plastic indentation undergoes significant changes. Initially, the microhardness value decreases by  $\approx 0.4$  GPa and, depending on the mutually perpendicular lines along which the surface profiling took place, is equal to 0.026 GPa and 0.07 GPa. Then the microhardness value increases to practically average values of 0.35 GPa. Therefore, a change in microhardness during surface profiling indicates changes in the physical and mechanical properties of the material in a small area near the point of impact. At the same time, the hardness of the material in these areas is significantly reduced, and repeated firing may result in complete penetration of the multilayer armor package.*

**Keywords:** armor material, shock wave loading, armor penetration, microhardness, microhardness mapping.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.