

# Дослідження пробиття сердечником 7,62 – мм кулі Б – 32 багат шарового захисного елемента

## Research on the Penetration of a Multilayer Protective Element by a 7.62-mm Bullet B-32

**Сергій Бісик**

**Corresponding author:** доктор технічних наук, професор, начальник науково-випробувального відділу, e-mail: sergey-new@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5009-2113

**Олександр Наконечний**

ад'юнкт кафедри технічного забезпечення інституту логістики та підтримки військ (сил), e-mail: a.nakonechnui@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7124-9431

**Serhii Bisyk**

**Corresponding author:** Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department, e-mail: sergey-new@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5009-2113

**Oleksandr Nakonechnui**

PhD student of the Department of Technical Support of the Institute of Logistics and Support of Troops (Forces), e-mail: a.nakonechnui@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7124-9431

Національний університет оборони України, Київ, Україна

National University of Defense of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: December 15, 2025 | Revised: December 30, 2025 | Accepted: December 31, 2025

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.6.28>

**Мета роботи.** Дослідження протикольної стійкості багат шарових захисних елементів із різними варіантами розташування шарів матеріалів до ураження бронебійною кулею Б-32.

**Метод дослідження.** Чисельне моделювання, експеримент.

**Результати дослідження:** Максимальна відносна похибка між натурним експериментом та числовим моделюванням, за значеннями глибини проникнення не перевищує 7% для бронесталі та 8% для алюмінієвого. Отримане значення похибки між експериментальними і числовими результатами дозволяє застосовувати розроблену математичну модель числового рішення пробиття бронебійною кулею Б-32 захисних багат шарових елементів, як для оцінки рівня балістичної стійкості так і для проведення параметричних досліджень для вибору раціональних параметрів конструкції багат шарового захисного елемента. Отримані залежності зміни границі плинності показують, що її зростання для броньової сталі призводить до пропорційного зменшення глибини пробиття. Для алюмінієвого сплаву таке зменшення є не лінійним, що дозволяє стверджувати про отримані раціональні значення границі плинності не більше 300-350 МПа, так як подальше зростання границі плинності не призводить до значного зменшення пробиття але значно підвищує вартість такого алюмінієвого сплаву. За результатами досліджень встановлено, що комбінування шарів захисного елемента в різній послідовності дозволяє отримати різне значення протикольної стійкості. З оцінених варіантів багат шарових захисних елементів, стійкими до пробиття є зразки в яких перший шар має високу міцність (шар з бронесталі) і опирається на шар з алюмінієвого сплаву. Комбінування багат шарового захисного елемента у варіантах лицьового шару із алюмінію показує, що такі зразки мають некондиційні ураження. Виконання першого лицьового шару з бронесталі дає кращий результат порівняно із використанням двох еквівалентних за товщиною шарів бронесталі в проміжку між якими є шар алюмінієвого сплаву.

**Теоретична цінність дослідження.** Отримані результати розширюють наукові уявлення про механізми пробиття бронебійними кулями багат шарових металевих перешкод та вплив фізико-механічних характеристик матеріалів на процес проникнення. Розроблена та верифікована чисельна модель може бути використана для подальших теоретичних і параметричних досліджень у галузі балістичного захисту.

**Практична цінність дослідження.** Застосування багат шарових захисних елементів із поєднанням бронесталі та алюмінієвих сплавів дозволяє підвищити рівень протикольного захисту існуючої броньованої техніки без суттєвого збільшення габаритних розмірів та з незначним приростом маси. Додатковий шар алюмінієвого сплаву також підвищує протиосколкову стійкість конструкції.

**Оригінальність.** Оригінальність роботи полягає у комплексному поєднанні натурних експериментів і чисельного моделювання для оцінки пробиття бронебійною кулею Б-32 багат шарових захисних елементів, а також у визначенні раціональних параметрів матеріалів і порядку їх

**Purpose.** Research on the bulletproof resistance of multilayer protective elements with different options for arranging the layers of materials before being hit by a B-32 armor-piercing bullet.

**Method:** Numerical modeling, experiment.

**Findings.** The maximum relative error between the full-scale experiment and numerical modeling, in terms of penetration depth values, does not exceed 7% for armor steel and 8% for aluminum. The error value obtained between the experimental and numerical results allows us to apply the developed mathematical model of the numerical solution of penetration by an armor-piercing bullet B-32 of protective multilayer elements, both for assessing the level of ballistic resistance and for conducting parametric studies to select rational parameters of the design of a multilayer protective element. The obtained dependences of the change in the yield point show that its increase for armor steel leads to a proportional decrease in the penetration depth. For an aluminum alloy, such a decrease is not linear, which allows us to state that the obtained rational values of the yield point are no more than 300-350 MPa, since a further increase in the yield point does not lead to a significant decrease in penetration but significantly increases the cost of such an aluminum alloy. According to the results of the studies, it was established that combining the layers of the protective element in different sequences allows us to obtain different values of bulletproof resistance. Of the evaluated variants of multilayer protective elements, the most resistant to penetration are samples in which the first layer has high strength (layer of armor steel) and is supported by a layer of aluminum alloy. Combining a multilayer protective element in variants of the front layer of aluminum shows that such samples have standard damage. The use of the first front layer of armor steel gives a better result compared to the use of two equivalent thickness layers of armor steel with an aluminum alloy layer between them.

**Theoretical implications.** The results obtained expand scientific understanding of the mechanisms of armor-piercing bullets penetrating multilayer metal barriers and the influence of physical and mechanical characteristics of materials on the penetration process. The developed and verified numerical model can be used for further theoretical and parametric research in the field of ballistic protection.

**Practical implications.** The use of multilayer protective elements with a combination of armor steel and aluminum alloys allows to increase the level of bulletproof protection of existing armored vehicles without a significant increase in overall dimensions and with a slight increase in mass. An additional layer of aluminum alloy also increases the anti-fragmentation resistance of the structure.

**Originality.** The originality of the work lies in the complex combination of full-scale experiments and numerical modeling to assess the penetration of multilayer protective elements by the B-32 armor-piercing bullet, as well as in determining the rational parameters of the materials and the order of their arrangement, taking into account both ballistic efficiency and mass characteristics.

розташування з урахуванням як балістичної ефективності, так і масових характеристик.

**Обмеження дослідження.** Дослідження проведено для конкретного типу загрози — бронебійної кулі Б-32 калібру 7,62 мм. У чисельному моделюванні розглядався лише сердечник кулі без урахування оболонки. Розглянуті обмежена кількість матеріалів (Агтох 500 та сплав 5083 H111) і варіантів товщин та конфігурацій шарів. Остаточна оцінка ефективності запропонованих конструкцій потребує розширених натурних випробувань.

**Тип статті.** Концептуально-емпірична.

**Research limitations.** The study was conducted for a specific type of threat — the 7.62 mm B-32 armor-piercing bullet. In the numerical simulation, only the bullet core was considered, without taking into account the jacket. A limited number of materials (Armoх 500 and alloy 5083 H111) and variants of layer thicknesses and configurations were considered. The final assessment of the effectiveness of the proposed designs requires extended full-scale tests.

**Paper type:** Review, scientific-practical.

**Ключові слова:** математична модель, сердечник, озброєння та військова техніка, засоби ураження, експериментальні дослідження, захищеність, алюмінієві сплави, методика, план проведення експерименту, метод скінченних елементів, напружено-деформований.

**Key words:** Mathematical Model, Core, Weapons and Military Equipment, Means of Destruction, Experimental Research, Security, Aluminum Alloys, Methodology, Experimental Plan, Finite Element Method, Stress-Strain.

## Вступ

Підвищення захищеності особового складу та броньованих автомобілів є одним з пріоритетних напрямів досліджень, що безпосередньо впливають на ефективність виконання підрозділами Сил оборони поставлених завдань по відбиттю агресії російської федерації.

Встановлені експертним опитуванням загрози для ББМ (рис.1.) показують, що поряд з необхідністю забезпечення захищеності від протитанкових мін та саморобних пристроїв актуальним є підвищення балістичного захисту [1, 2, 3, 4].

На сьогодні методи дослідження складних високошвидкісних фізичних процесів (таких як удар, вибух та інші імпульсні навантаження) суттєво розвинулися в порівнянні з минулим століттям. Це пов'язано, насамперед, зі створенням нових елементів випробувальних установок, що дають можливість більш точно отримати експериментальні дані (напр. швидкості польоту ударників в момент зіткнення з перешкодою та після її пробиття, швидкості розльоту утворених внаслідок вибуху осколків, кумулятивних струменів та ін.). Проте такі експерименти вимагають використання складного обладнання та залучення значних коштів. Сучасний розвиток обчислювальної техніки в поєднанні з числовими методами дозволяє проводити дослідження швидкопротікаючих процесів, частково або повністю замінюючи проведення натурального експерименту, або значно його доповнюючи. Крім того, застосування числового моделювання дозволяє значно скоротити фінансові витрати на проведення експериментальних досліджень. Поєднання натурних експериментів з числовим моделюванням дає змогу більш швидко та точно отримувати інформацію про поведінку об'єктів при складних навантаженнях.

Тому, створення числових моделей процесів, що досліджуються, перевірка їх адекватності, стійкості, збіжності та оцінка точності рішення, вибір методу чисельного рішення та експериментальна апробація отриманих результатів є актуальним науковим завданням при дослідженні шляхів забезпечення балістичного захисту ББМ [5].

Для забезпечення балістичного захисту броньованих автомобілів можна виділити такі основні напрями: застосування в їх конструкції загального, локального та/або рознесення бронювання, модульність конструкції, приховане або скрите бронювання. Ці заходи можуть бути забезпечені за рахунок раціонального розміщення захисних балістичних елементів, використанням сучасних матеріалів та комбінуванням варіантів захисних матеріалів. Одним із таких напрямів комбінування є створення багат шарових захисних елементів, що дозволяє підвищити рівень балістичного захисту, відповідно до існуючих загроз, без суттєвого зростання маси та практично не змінюючи габаритні розміри існуючої конструкції зразка [6, 7, 8, 9, 10, 11].

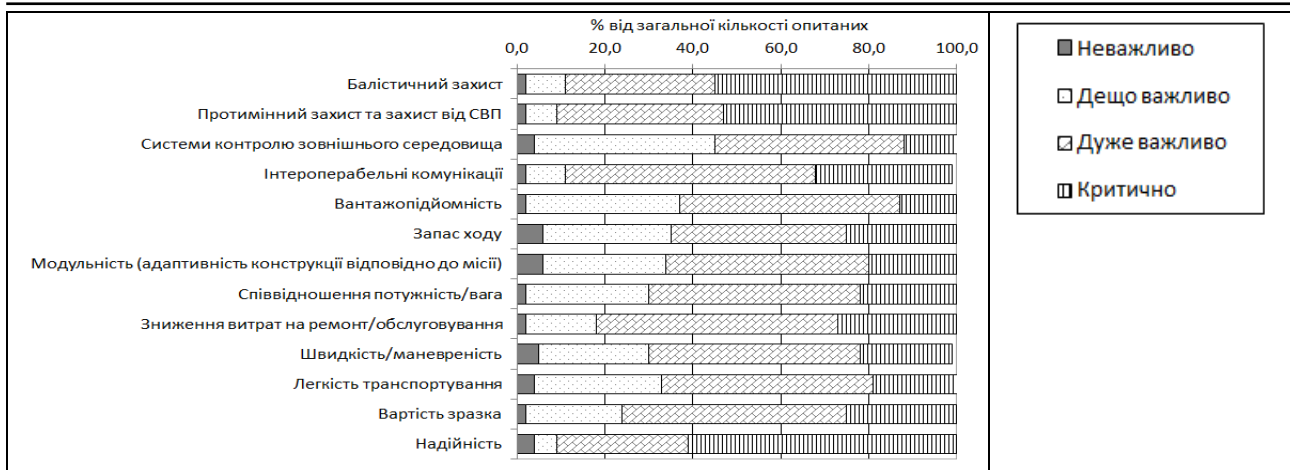


Рисунок 1 – Напрями розвитку ББМ, що визначені експертами актуальними до 2028 року



Рисунок 2 – Напрями розвитку ББМ, що визначені експертами актуальними до 2028 року

Однією із масових загроз, які існують на сьогоднішній день, є 7,62-мм бронебійні кулі Б-32. Зважаючи на вище викладене, проведені дослідження пробиття 7,62-мм кулею Б-32 багатозарового захисного елемента, що є метою статті.

### Методологія дослідження

Опис моделей матеріалів, що застосовувались при проведенні моделювання, геометричні розміри та фізико-механічні властивості матеріалів, методика проведення чисельного моделювання, що застосовані при моделюванні наведенні в таких роботах [12, 13, 14].

Об'єктом моделювання обрано броньову сталь Arмох 500, алюмінієвий сплав 5083 Н111, фізико-механічні властивості яких та сердечника 7,62 мм кулі Б-32 наведено таблиці 1. Детальний опис результатів дослідження фізико-механічних властивостей броньових сталей наведено в роботах [15,16, 17, 18, 19, 20].

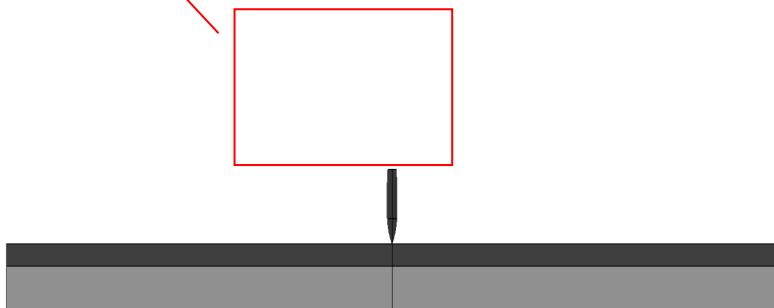
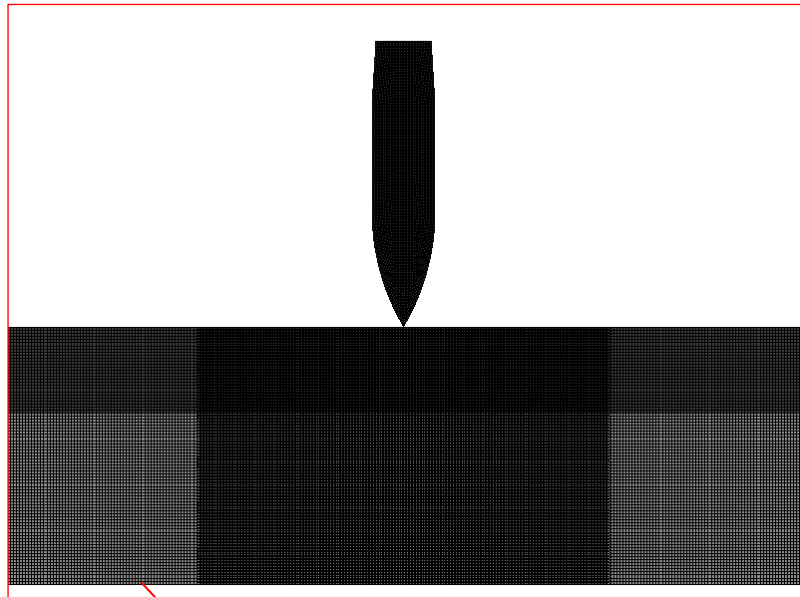
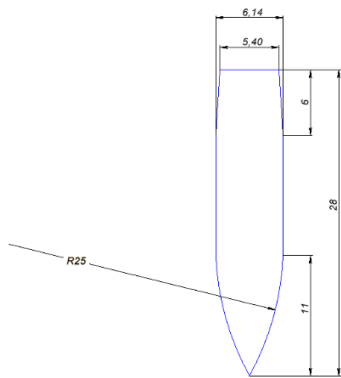
Габаритні розміри листа багатозарового захисного елемента складають 300x300 мм. При проведенню чисельному моделюванні взято до уваги тільки сердечник 7,62-мм кулі Б-32, геометричні розміри якого вказані на рис.3.

Скінчено-елементна модель (СЕМ) сердечника кулі та гомогенної перешкоди наведена на рис.4. СЕМ утворена оболонковими вісесиметричними елементами. Характерні розміри елементів СЕМ в зоні пробиття складають 0,15x0,15 мм.

Таблиця 1 – Фізико-механічні характеристики об'єктів моделювання

№ з/п	Об'єкт	Фізико-механічні характеристики					
		$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	E, ГПа	$\nu$	$\delta$ , %	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1.	Бронесталь Arмох 500	1250	1500	210,0	0,29	8,0	7850
2.	Алюмінієвий сплав 5083 Н111	230	460	72,0	0,32	16,0	2650
3.	Сердечник кулі	880	1040	210,0	0,33	10	7850

$\sigma_{0,2}$  – границя плинності матеріалу,  $\sigma_B$  – границя міцності матеріалу,  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона,  $\delta$  – відносне подовження,  $HV$  – твердість за Вікерсом.



**Рисунок 1** – Геометричні розміри сердечника 7,62 мм кулі Б-32 (сталь У12а)

**Рисунок 2** – Скінченно-елементна модель багатошарового захисного елемента та сердечника 7,62 мм кулі Б-32

Застосування числового моделювання для дослідження процесу пробиття кулями захисних конструкцій передбачає перевірку адекватності, збіжності і точності самої числової моделі. Оцінка точність вирішення, для цього класу завдань, може бути проведена за різними параметрами, одним з яких є значення глибини проникання сердечника кулі в обрані матеріали багатошарового захисного елемента. З цією метою проведені експериментальні дослідження з оцінкою глибини проникання сердечника кулі Б-32 в набір бронеплит та набір плит із алюмінієвого сплаву 5083 H111. За результатами таких натурних експериментів отримано значення глибини проникнення сердечника кулі в матеріал та проведено порівняння із результатами чисельного моделювання. Після оцінки похибки моделювання проведені теоретичні дослідження стійкості різних варіантів багатошарових захисних елементів із застосуванням чисельного моделювання.

Для проведення досліджень обрано шість варіантів багатошарових захисних елементів, що є поєднанням бронеплит та плит з алюмінієвого сплаву (рис. 5). Основними параметрами, що визначали таке поєднання було наявність сортаменту відповідних матеріалів (бронесталі та алюмінієвого сплаву) та результати попередніх теоретичних розрахунків балістичної стійкості. Значення поверхневої маси, для цих варіантів багатошарового захисного елемента наведені на рис. 6 в порівнянні із еквівалентним за протикольною стійкістю листом бронесталі.

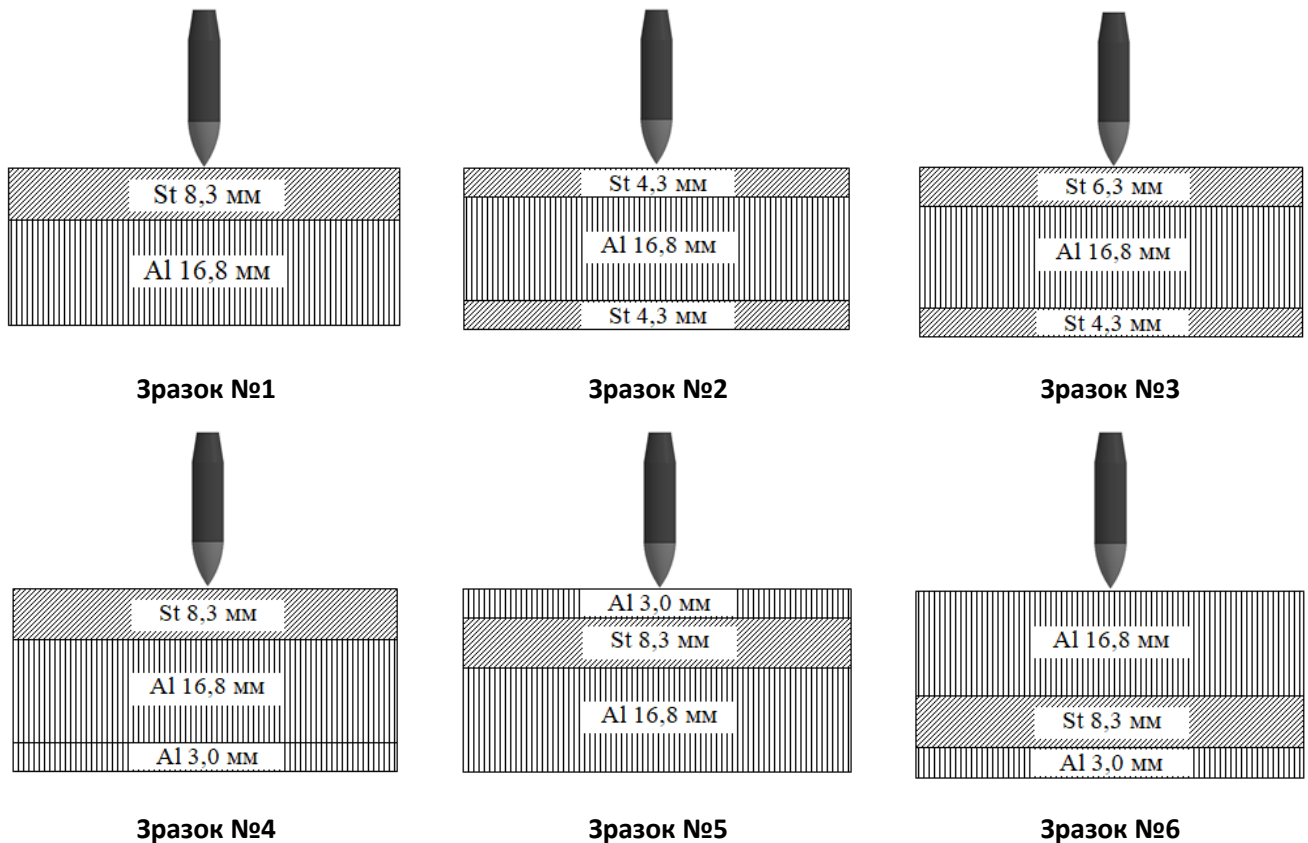


Рисунок 3 – Схеми багатшарових захисних балістичних елементів

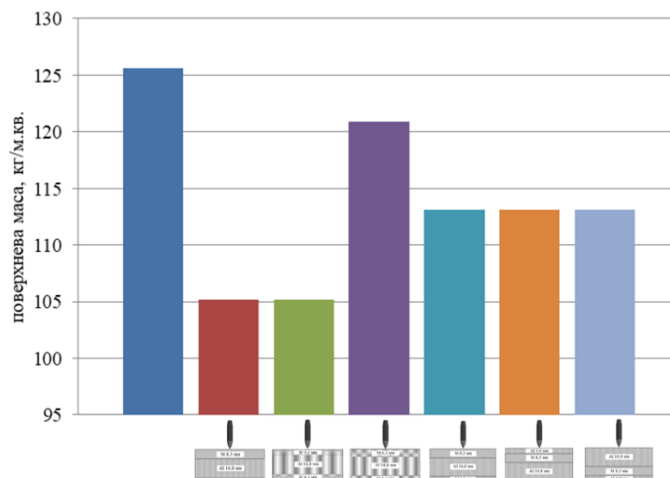


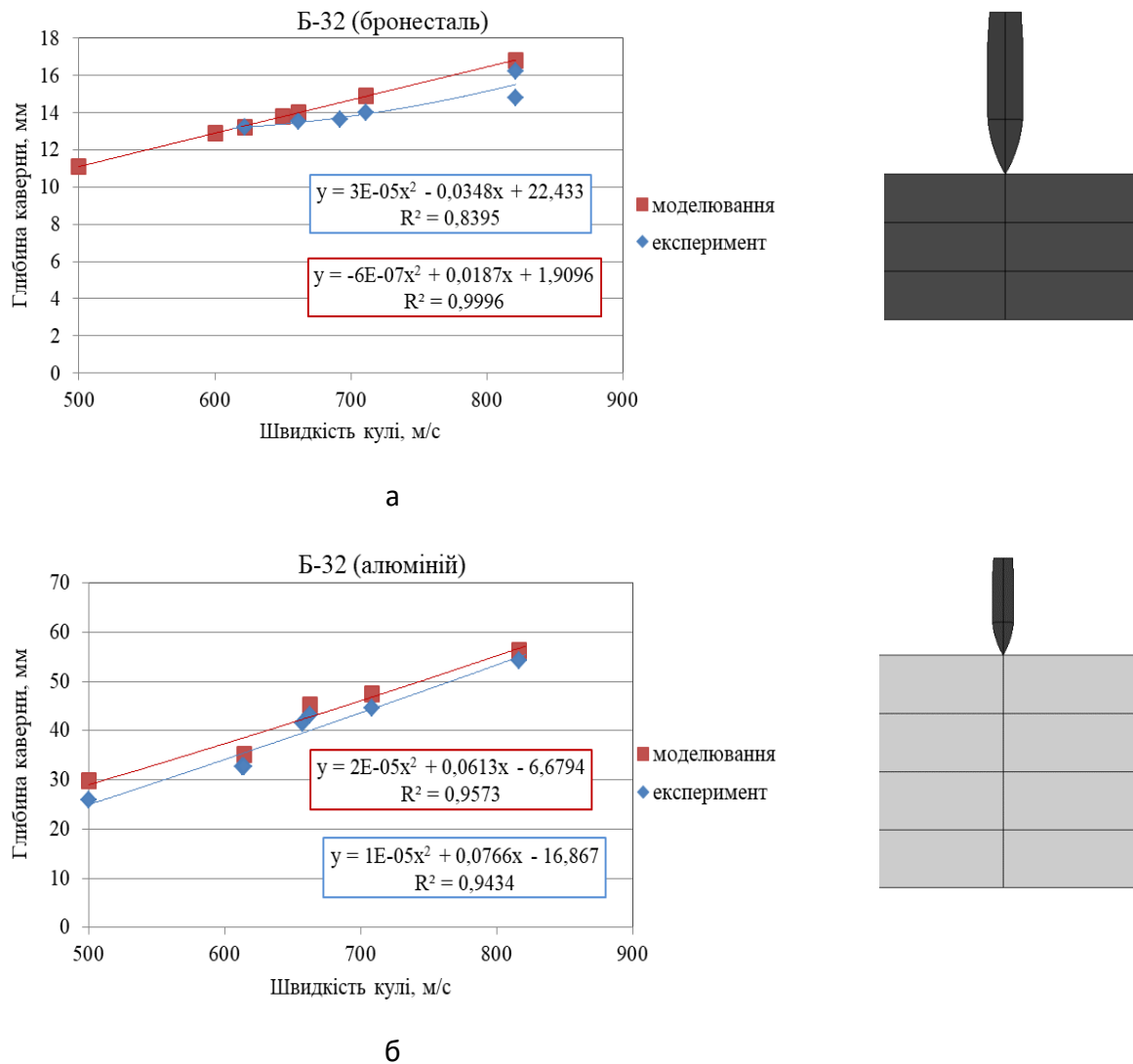
Рисунок 4 – Поверхнева маса багатшарових захисних балістичних елементів

### Результати та обговорення

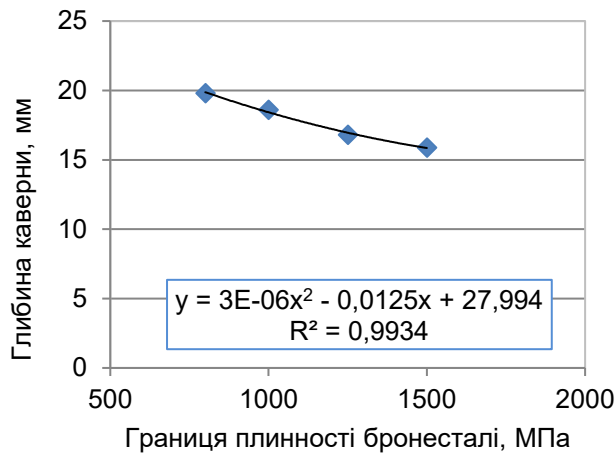
На першому етапі проведені експериментальні дослідження проникнення сердечника кулі Б-32 в бронесталь та в алюмінієвий сплав. За результатами експерименту отримане значення глибини проникнення (каверни). Після цього, на основі розробленої моделі проведено чисельне моделювання. Порівняння отриманих результатів чисельного моделювання та натурального експерименту наведено на рис.7. З отриманих результатів можна зробити висновок, що максимальна відносна похибка між натурним експериментом та числовим моделюванням для бронесталі не перевищує 7%, для алюмінієвого сплаву не перевищує 8%. Отримане значення похибки між експериментальними і числовими результатами дозволяє

зробити висновок про можливість застосування розробленої математичної моделі числового рішення пробиття бронебійними кулями захисних багатошарових елементів (рис. 5), як для оцінки рівня балістичної стійкості так і для проведення параметричних досліджень для вибору раціональних параметрів конструкції багатошарового захисного елемента. Отримані рівняння регресії з відповідною похибкою апроксимації наведенні на рис. 7.

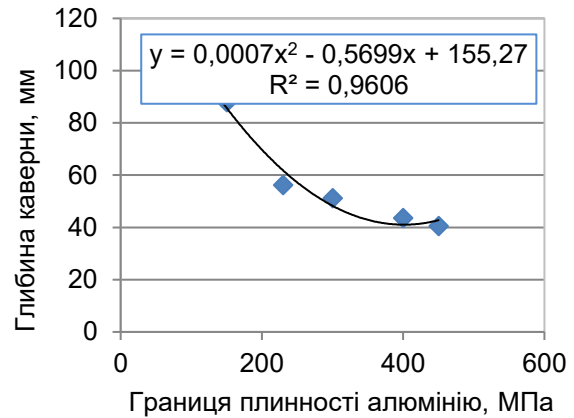
Для оцінки впливу фізико-механічних характеристик матеріалу мішені проведено розрахунок проникнення сердечника бронебійної кулі Б-32 в набір пластин з бронесталі та з алюмінієвого сплаву (рис.8). Отримані залежності показують, що зростання границі плинності броньової сталі призводить до пропорційного зменшення глибини пробиття. Для алюмінієвого сплаву таке зменшення є не лінійним, що дозволяє стверджувати про отримані раціональні значення границі плинності не більше 300-350 МПа, так як подальше зростання границі плинності не призводить до значного зменшення пробиття але значно підвищує вартість такого алюмінієвого сплаву.



**Рисунок 5** – Значення глибини проникнення кулі Б-32 в бронесталь (а) та в алюмінієвий сплав (б) отримані експериментальним та розрахунковим шляхом



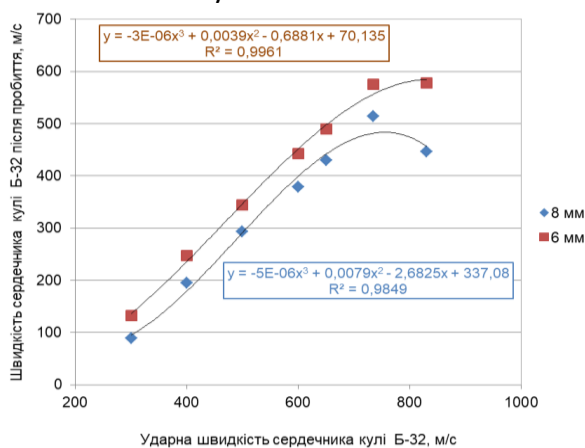
а



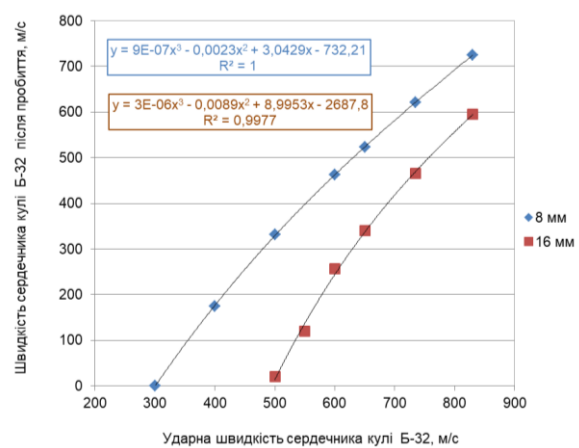
б

**Рисунок 6** – Значення глибини проникнення кулі Б-32 в бронесталь (а) та в алюмінієвий сплав (б) при різних значеннях границі плинності матеріалу

Із використанням розробленої чисельної моделі проведено дослідження з визначення швидкості сердечника бронебійної кулі Б-32 після пробиття 6 мм та 8 мм бронесталі а також 8 мм та 16 мм сплаву алюмінію.



а

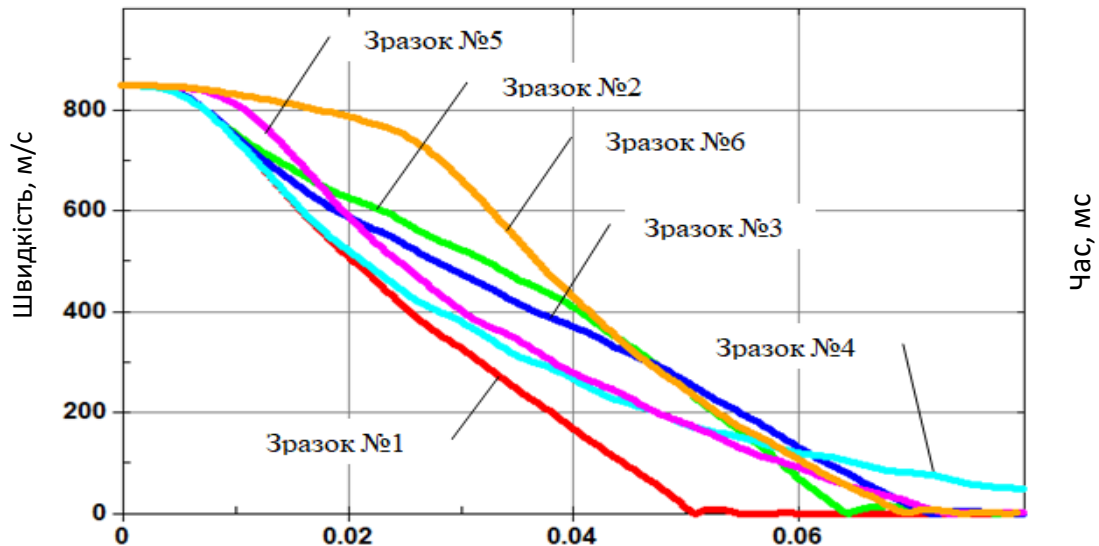


б

**Рисунок 7** – Значення швидкості сердечника кулі Б-32 після пробиття листа бронесталь (а) та алюмінієвого сплаву (б) з різною товщиною

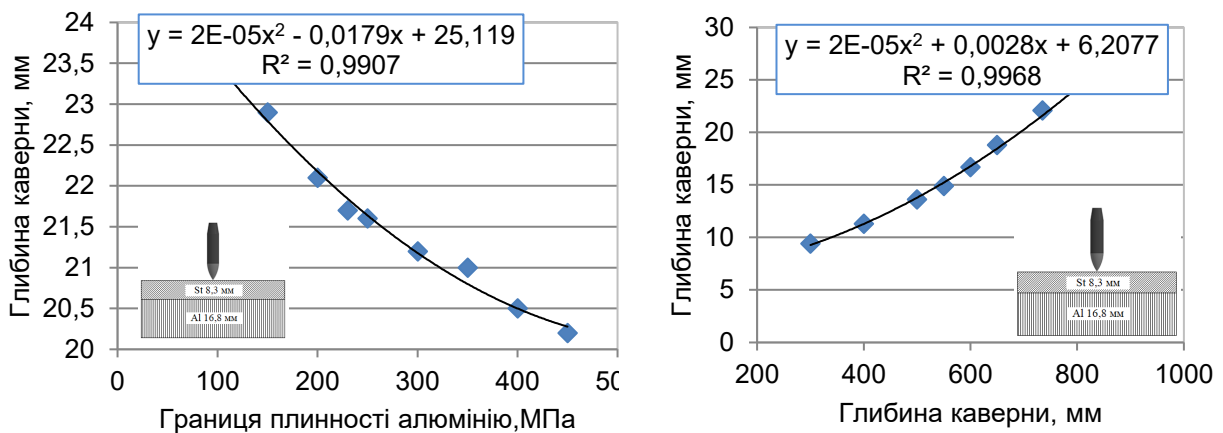
Розраховані значення швидкості сердечника кулі при пробитті різних варіантів багат шарового захисного елемента наведенні на рис.10. Результати розрахунку остаточного проникнення сердечника кулі Б-32 в багат шаровий захисний елемент наведенні на рис. 11.

За результатами чисельного моделювання можна зробити висновок, що стійкими до пробиття кулею Б-32 є зразки багат шарового захисного елемента №1, №4 та №5, інші зразки мають некондиційне ураження. При цьому маса зразка №1 менша від еквівалентної за протикують стійкістю броне плитою на 20 %. Зразки №4 та №5 мають дещо більшу масу порівняно із зразком №1 але меншу на 10% масу порівняно з броне плитою.



**Рисунок 8** – Падіння швидкості сердечника кулі для різних варіантів багат шарового захисного елемента (ударна швидкість сердечника 850 м/с)

Зважаючи на те, що комбінування шарів багат шарового захисного елемента за схемою зразка №1 має достатній рівень протикольної стійкості та найменшу поверхневу масу, для такої схеми було проведено додаткові дослідження із визначенням впливу границі плинності другого шару (алюмінієвого сплаву) на глибину проникнення сердечника кулі (рис.12).



**Рисунок 9** – Значення глибини проникнення кулі Б-32 в багат шаровий захисний елемент (зразок №1) при різній границі плинності другого шару (алюмінієвий сплав) (а) та при різних значеннях ударної швидкості сердечника кулі (б)

## Висновки

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. За результатами проведених натурних випробувань отримані значення проникнення бронебійної кулі Б-32 в бронесталь Arмох 500 та в Алюмінієвий сплав 5083 Н111. Для ідентифікації параметрів чисельної моделі проведене моделювання проникнення кулі Б-32 у ці матеріали. За результатами оцінена максимальна відносна похибка між натурним експериментом та числовим моделюванням, яка для бронесталі не перевищує 7% для алюмінієвого сплаву не перевищує 8%. Отримане значення похибки між експериментальними

і числовими результатами дозволяє зробити висновок про можливість застосування розробленої математичної моделі числового рішення пробиття бронебійною кулею Б-32 захисних багат шарових елементів, як для оцінки рівня балістичної стійкості так і для проведення параметричних досліджень для вибору раціональних параметрів конструкції багат шарового захисного елемента.

2. Отримані залежності зміни границі плинності показують, що її зростання для броньової сталі призводить до пропорційного зменшення глибини пробиття. Для алюмінієвого сплаву таке зменшення є не лінійним, що дозволяє стверджувати про отримані раціональні значення границі плинності не більше 300-350 МПа, так як подальше зростання границі плинності не призводить до значного зменшення пробиття але значно підвищує вартість такого алюмінієвого сплаву.

3. Із використанням розробленої чисельної моделі проведено дослідження з визначення швидкості сердечника бронебійної кулі Б-32 після пробиття 6 мм та 8 мм бронесталі а також 8 мм та 16 мм сплаву алюмінію. Отримані залежності дозволяють оцінити кількість енергії витраченої на пробиття.

4. Комбінування шарів захисного елемента в різній послідовності дозволяє отримати різне значення протикульної стійкості. З оцінених варіантів багат шарових захисних елементів, стійкими до пробиття є зразки в яких перший шар має вищу міцність (шар з бронесталі) і опирається на шар з алюмінієвого сплаву. Комбінування багат шарового захисного елемента у варіантах лицьового шару із алюмінію показує, що такі зразки мають некондиційні ураження.

5. Виконання першого лицьового шару з бронесталі дає кращий результат порівняно із використанням двох еквівалентних за товщиною шарів бронесталі в проміжку між якими є шар алюмінієвого сплаву.

Застосування багат шарових захисних елементів з поєднанням листів бронесталі та алюмінієвих сплавів може бути актуальним для підвищення рівня протикульного захисту існуючої броньованої техніки практично без збільшення габаритних розмірів та з не значним збільшенням доданої маси. Крім того наявність додаткового шару алюмінієвого сплаву матиме позитивний вплив на протиосколкову стійкість.

Напрямами подальших досліджень є експериментальна перевірка отриманих теоретичних розрахунків.

### **Фінансування**

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

### **Конкуруючі інтереси**

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

### **Список використаних джерел**

1. Armoured vehicles market report 2018 [Електронний ресурс]. – URL : <https://www.defenceiq.com/armoured-vehicles/whitepapers/global-armoured-vehicles-market-report> (дата звернення: 02.10.2025).
2. Майстренко А. Л., Куц В. І., Кулич В. Г., Нешпор О. В., Бісик С. П. Стримати кулю. Захист бойових броньованих машин від ураження кулями калібру 12,7 мм та 14,5 мм // Defense Express. – 2017. – № 3–4 (березень–квітень). – С. 58–60.
3. Давидовський, Л., Бісик, С., Сєдов, С., Голуб, В., & Барановський, А. (2025). Дослідження новітнього російського бронеавтомобіля підвищеної захищеності "Тайфун-К". *Social Development and Security*, 15(3), 119-141. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.3.13>.

4. Давидовський, Л., Барановський, А., Бісик, С., Саковець, В., Голуб, В., & Сєдов, С. (2025). Дослідження трофейного зразка російської БМД-4М "Садовниця". *Social Development and Security*, 15(5), 124-138. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.5.10>.
5. Майстренко А. Л., Куц В. І., Кулич В. Г., Нешпор О. В., Бісик С. П. Щодо підвищення захисту бойових броньованих машин від ураження 12,7-мм кулями Б-32 // *Озброєння та військова техніка*. – 2017. – № 1 (13). – С. 18–23. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.1\(13\).18-23](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.1(13).18-23).
6. Surya M., Pavithran S., Sanjay Kumar A., Jagan K., Lokavarapu B. R. Ballistic impact response of bi-layered ceramic encapsulated steel armour against monolithic tri-conical solid projectile // *Results in Engineering*. – 2025. – Vol. 28. – Art. 107176. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107176>.
7. Baranovskyi D., Drahobetskyi V., Bulakh M., Symonova A. Improving the energy and physical-mechanical characteristics of armor-protective elements of a new design // *Materials & Design*. – 2025. – Vol. 260. – Art. 115263. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.115263>.
8. Hu Y. G., De'ana, Li, Changran. Study of ballistic impact performance of the bioinspired flexible multilayered filling armor by different projectiles // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2025. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-10698-5>.
9. Jull E. I. L., Dekker R., Amaral L. Impact of adhesive layer properties on ceramic multi-layered ballistic armour systems: A review // *Defence Technology*. – 2025. – Vol. 47. – P. 292–303. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.11.008>.
10. Li J., Nie H., Wu J. Structure design optimization of sapphire transparent armor through numerical simulation of ballistic impact response // *Materials Today Communications*. – 2025. – Vol. 42. – Art. 111404. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111404>.
11. Saravanan M. K., Pranav A., Arun Sabaris Prabu R., George J. Analytical modeling of the ballistic performance of single and multilayered 2024 aluminum alloy through experimental and numerical investigations // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. – 2025. <https://doi.org/10.1080/15397734.2025.2556477>.
12. Бісик С. П., Давидовський Л. С., Сливінський О. А., Арістархов О. М., Сєдов С. Г. Дослідження швидкості сердечника 7,62-мм кулі після пробиття броньової плити // *Труди Університету*. – 2022. – № 2 (171). – С. 118–128.
13. Бісик С. П., Сливінський О. А., Купріненко О. М. Чисельне моделювання пробиття 7,62-мм кулею кутового зварного з'єднання броньової сталі // *Військово-технічний збірник*. – 2022. – № 26/27. – С. 22–30.
14. Бісик С. П., Чернозубенко О. В., Схабицький В. Р., Сливінський О. А., Ханюков В. А. Числове моделювання пробиття гомогенної перешкоди ударниками з різною формою головної частини // *Озброєння та військова техніка*. – 2017. – № 2 (14). – С. 17–22. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.2\(14\).17-22](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.2(14).17-22).
15. Бісик С. П., Чернозубенко О. В., Сливінський О. А., Схабицький В. Р., Корбач В. Г. Порівняння ефективності підходів до числового моделювання пробиття ударником гомогенної перешкоди // *Озброєння та військова техніка*. – 2017. – № 3 (15). – С. 8–15. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.3\(15\).8-15](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.3(15).8-15).
16. Сливінський О. А., Бісик С. П., Чернозубенко О. В. Структура та властивості зварних з'єднань броньових сталей закордонного виробництва // *Технологические системы*. – 2016. – № 3 (76). – С. 103–112.
17. Сливінський О. А., Бісик С. П., Воронюк А. М., Миронов Я. А. Вплив погонної енергії зварювання на знеміцнення зони термічного впливу загартованих броньових сталей // *Зб. наук. праць ЦНДІ ОВТ ЗС України*. – 2020. – Вип. 1 (76). – С. 261–276.

18. Katok O. A., Kravchuk R. V., Kharchenko V. V., Bisyk S. P. et al. Strength assessment of welded joints of high-strength alloy steels by indentation method // *Strength of Materials*. – 2020. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00224-4>.
19. Чижик Г. В., Рогол Л., Корнева А., Широков А. В., Березовський О. М., Бісик С. П., Сливінський О. А. Особливості деформування та руйнування сталей різних класів міцності в умовах ударного стиску // *Проблеми міцності*. – 2025. – № 1 (493). – С. 87–100.
20. Slyvins'kyi O. A., Kvasnyts'kyi V. V., Vladymyrskyi I. A., Bisyk S. P., Chvertko Ye. P., Kovalenko V. L. Effect of heat input during welding on the microstructure and mechanical properties of the heat-affected zone of MIL-A-46100 armour steel // *Metallophysics and Advanced Technologies*. – 2024. – Vol. 46, No. 7. – P. 663–677. <https://doi.org/10.15407/mfint.46.07.0663>.
21. Kharchenko V., Katok O., Sereda A., Rudnitskyi M., Kravchuk R., Bisyk S. Determination of strength characteristics of high-strength sheet steels by hardness and instrumented indentation // *Procedia Structural Integrity*. – 2022. – Vol. 36. – P. 277–283. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.035>

## References

1. Armoured vehicles market report 2018. (2018). Defence IQ. <https://www.defenceiq.com/armoured-vehicles/whitepapers/global-armoured-vehicles-market-report>
2. Maistrenko, A. L., Kushch, V. I., Kulych, V. H., Neshpor, O. V., & Bisyk, S. P. (2017). *Strymaty kuliu. Zakhyst boiovykh bronovanykh mashyn vid urazhennia kuliamy kalibru 12.7 mm ta 14.5 mm* [To stop a bullet. Protection of combat armored vehicles against 12.7 mm and 14.5 mm bullets]. *Defense Express*, (3–4), 58–60.
3. Davydovskyi, L., Bisyk, S., Siedov, S., Holub, V., & Baranovskyi, A. (2025). Doslidzhennia novitnoho rosiiskoho broneavtomobilia pidvyshchenoi zakhyshchenosti “Taifun-K” [Study of the latest Russian high-protection armored vehicle “Typhoon-K”]. *Social Development and Security*, 15(3), 119–141. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.3.13>
4. Davydovskyi, L., Baranovskyi, A., Bisyk, S., Sakovets, V., Holub, V., & Siedov, S. (2025). Doslidzhennia trofeinoho zrazka rosiiskoi BMD-4M “Sadovnytsia” [Study of a captured Russian BMD-4M “Sadovnytsia”]. *Social Development and Security*, 15(5), 124–138. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.5.10>
5. Maistrenko, A. L., Kushch, V. I., Kulych, V. H., Neshpor, O. V., & Bisyk, S. P. (2017). Shchodo pidvyshchennia zakhystu boiovykh bronovanykh mashyn vid urazhennia 12.7-mm kuliamy B-32 [On improving the protection of combat armored vehicles against 12.7-mm B-32 bullets]. *Ozbroyennia ta viiskova tekhnika*, (1(13)), 18–23. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.1\(13\).18-23](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.1(13).18-23)
6. Surya, M., Pavithhran, S., Sanjay Kumar, A., Jagan, K., & Lokavarapu, B. R. (2025). Ballistic impact response of bi-layered ceramic encapsulated steel armour against monolithic tri-conical solid projectile. *Results in Engineering*, 28, Article 107176. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107176>
7. Baranovskyi, D., Drahobetskyi, V., Bulakh, M., & Symonova, A. (2025). Improving the energy and physical-mechanical characteristics of armor-protective elements of a new design. *Materials & Design*, 260, Article 115263. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.115263>

8. Hu, Y. G., De'ana, Li, & Changran. (2025). Study of ballistic impact performance of the bioinspired flexible multilayered filling armor by different projectiles. *Journal of Materials Engineering and Performance*. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-10698-5>
9. Jull, E. I. L., Dekker, R., & Amaral, L. (2025). Impact of adhesive layer properties on ceramic multilayered ballistic armour systems: A review. *Defence Technology*, 47, 292–303. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.11.008>
10. Li, J., Nie, H., & Wu, J. (2025). Structure design optimization of sapphire transparent armor through numerical simulation of ballistic impact response. *Materials Today Communications*, 42, Article 111404. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111404>
11. Saravanan, M. K., Pranav, A., Arun Sabaris Prabu, R., & George, J. (2025). Analytical modeling of the ballistic performance of single and multilayered 2024 aluminum alloy through experimental and numerical investigations. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. <https://doi.org/10.1080/15397734.2025.2556477>
12. Bisyk, S. P., Davydovskiy, L. S., Slyvinskyi, O. A., Aristarkhov, O. M., & Siedov, S. H. (2022). Doslidzhennia shvydkosti serdechnyka 7.62-mm kuli pislia probyttia bronovoi plyty [Study of the velocity of a 7.62-mm bullet core after penetration of an armor plate]. *Trudy Universytetu*, (2(171)), 118–128.
13. Bisyk, S. P., Slyvinskyi, O. A., & Kuprinenko, O. M. (2022). Chyselne modeliuвання probyttia 7.62-mm kuleiu kutovoho zvarnogo ziednannia bronovoi stali [Numerical modeling of penetration of an angular welded joint of armor steel by a 7.62-mm bullet]. *Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk*, (26/27), 22–30.
14. Bisyk, S. P., Chernozubenko, O. V., Skhabytskyi, V. R., Slyvinskyi, O. A., & Khaniukov, V. A. (2017). Chyslove modeliuвання probyttia homohennoi pereshkody udarnykamy z riznoiu formoiu holovnoi chastyny [Numerical simulation of penetration of a homogeneous barrier by projectiles with different nose shapes]. *Ozbroyennia ta viiskova tekhnika*, (2(14)), 17–22. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.2\(14\).17-22](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.2(14).17-22)
15. Bisyk, S. P., Chernozubenko, O. V., Slyvinskyi, O. A., Skhabytskyi, V. R., & Korbach, V. H. (2017). Porivniannia efektyvnosti pidkhodiv do chyslovoho modeliuвання probyttia udarnykom homohennoi pereshkody [Comparison of approaches to numerical modeling of penetration of a homogeneous barrier by a projectile]. *Ozbroyennia ta viiskova tekhnika*, (3(15)), 8–15. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.3\(15\).8-15](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.3(15).8-15)
16. Slyvinskyi, O. A., Bisyk, S. P., & Chernozubenko, O. V. (2016). Struktura ta vlastyvoli zvarnykh ziednan bronovykh stalei zakordonnoho vyrobnytstva [Structure and properties of welded joints of foreign-made armor steels]. *Tekhnologicheskie sistemy*, (3(76)), 103–112.
17. Slyvinskyi, O. A., Bisyk, S. P., Voroniuk, A. M., & Myronov, Ya. A. (2020). Vplyv pohonnoi enerhii zvaryuvannia na znemitsnennia zony termichnogo vplyvu zahartovanykh bronovykh stalei [Effect of welding linear energy on softening of the heat-affected zone of hardened armor steels]. *Zbirnyk naukovykh prats TsNDI OVT ZS Ukrainy*, (1(76)), 261–276.
18. Katok, O. A., Kravchuk, R. V., Kharchenko, V. V., Bisyk, S. P., et al. (2020). Strength assessment of welded joints of high-strength alloy steels by indentation method. *Strength of Materials*. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00224-4>

19. Chyzhyk, H. V., Rohal, L., Korneva, A., Shyrovkov, A. V., Berezovskyi, O. M., Bisyk, S. P., & Slyvynskiy, O. A. (2025). Osoblyvosti deformuvannya ta ruinovannya stalei riznykh klasiv mitsnosti v umovakh udarnoho stysku [Features of deformation and fracture of steels of different strength classes under impact compression]. *Problemy mitsnosti*, (1(493)), 87–100.
20. Slyvins'kyy, O. A., Kvasnyts'kyy, V. V., Vladymyrskiy, I. A., Bisyk, S. P., Chvertko, Ye. P., & Kovalenko, V. L. (2024). Effect of heat input during welding on the microstructure and mechanical properties of the heat-affected zone of MIL-A-46100 armour steel. *Metallophysics and Advanced Technologies*, 46(7), 663–677. <https://doi.org/10.15407/mfint.46.07.0663>
21. Kharchenko, V., Katok, O., Sereda, A., Rudnitskyi, M., Kravchuk, R., & Bisyk, S. (2022). Determination of strength characteristics of high-strength sheet steels by hardness and instrumented indentation. *Procedia Structural Integrity*, 36, 277–283. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.035>