

Д. В. КИСЛИЦЯ

ТЕНДЕНЦІ РОЗВИТКУ СУЧАСНИХ БОЙОВИХ МАШИН ПІХОТИ ТА МЕТОДІВ ЇХ ДОСЛІДЖЕНЬ (ОГЛЯДОВА СТАТТЯ)

В умовах сучасних бойових дій виникли нові і набагато вищі вимоги до вдосконалення параметрів захищеності легкоброньованих машин. Завжди була необхідність у зразках бойових броньованих машин, які здатні бути одночасно достатньо захищеними, мати достатню вогневу підтримку піхоти, маневреними та окрім всього мати відносно низьку ціну порівняно з досить важкими танками. Наразі бойові машини піхоти є найближчими до цих запитів, але вони все ж мають ряд недоліків порівняно з іншими бойовими броньованими машинами. Через особливості конструкції ці машини хоч і відносяться до легкоброньованої техніки, все ж мають захист за рівнем ближче до танків, що дозволяє їм краще захищати екіпаж. Багато країн мають свої зразки цього виду бронетехніки, що була розроблена та вдосконалювалась протягом довгого періоду, та з використанням інформації, отриманої з різних військових конфліктів по усьому світу. Нові способи ураження ще більше підняли вимоги до захищеності машин, таким чином, виникла необхідність для більш різностороннього розгляду загроз у дослідженнях захищеності бойових броньованих машин. Метод скінченних елементів як один з найпопулярніших і досить ефективних методів, пройшов досить складний і довгий шлях та зараз широко використовується в сучасних програмах. Одна із згаданих в сучасних дослідженнях проблем є балістична стійкість, яка не втрачає актуальність зараз та вивчається в тому числі з використанням можливостей методу скінченних елементів. Окрім цього, досить важливою є проблема мінної стійкості, яка також досліджується цим методом. Розглянуто сучасні бойові машини піхоти, що вважаються актуальними та перебувають на озброєнні різних країн. Проаналізовано, які методи розрахунку використовуються для досліджень в області захищеності різних легкоброньованих машин та їх частин.

Ключові слова: бойова машина піхоти; легкоброньована машина; методи дослідження

D. KISLITZA

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF MODERN INFANTRY FIGHTING VEHICLES AND METHODS OF THEIR RESEARCH (OVERVIEW ARTICLE)

In the context of modern warfare, new and much higher requirements have arisen for improving the protection parameters of light armored vehicles. There has always been a need for combat armored vehicles that are sufficiently protected, provide adequate fire support for infantry, are maneuverable, and, above all, are relatively inexpensive compared to heavy tanks. Currently, infantry fighting vehicles are closest to these requirements, but they still have a number of disadvantages compared to other combat armored vehicles. Due to their design features, although these vehicles are classified as lightly armored vehicles, they still have protection levels closer to those of tanks, which allows them to assist. Many countries have their own models of this type of armored vehicle, which has been developed and improved over a long period of time, using information obtained from various military conflicts around the world. New methods of attack have further increased the requirements for vehicle protection, thus creating a need for a more comprehensive consideration of threats in research on the protection of combat armored vehicles. The finite element method, as one of the most popular and effective methods, has come a long way and is now widely used in modern programs. One of the problems mentioned in modern research is ballistic resistance, which remains relevant today and is being studied, among other things, the finite element method. In addition, the problem of mine resistance, is also quite important and is being explored by this method. Modern infantry fighting vehicles that are considered relevant and are in service in various countries are considered. The calculation methods used for research in the field of protection of various light armored vehicles and their parts are analyzed.

Keywords: infantry fighting vehicles; lightly armored vehicle; research methods

Вступ. Тенденції світових конфліктів вже сьогодні підняли багато нових вимог до сфери обороноздатності держав. Зокрема, активне використання різних типів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та First Person View (FPV) дронів як засобів розвідки й ураження створило нагальну потребу у розробці ефективних методів протидії цим технологіям. Не зважаючи на нові вимоги, одним із дуже важливих напрямів у цій сфері є легкоброньовані машини (ЛБМ), а саме сучасні зразки бойових машин піхоти (БМП), бронетранспортери (БТР) та інші. Вони повинні виконувати дуже важливі ролі на полі бою – захист та підтримка піхоти. Порівняно з танками, легкоброньовані машини мають значно менші можливості протистояти засобам ураження, потужнішим за великокаліберні кулемети, проте вони є середньою але ключовою ланкою між піхотою та важкою технікою.

На жаль, через складність проектування нових зразків бронетехніки та, водночас, зі стрімким розвитком озброєння разом із удосконаленням сучасних засобів ураження, більшість зразків досі повністю не відповідають вимогам сучасної війни. Попри це, досі з'являються рішення для модернізації існуючих машин, та спроби усунути їх вразливості і підвищити захищеність.

У різних країнах є своє рішення того, як повинна виглядати сучасна ЛБМ. Проте більшість зразків є переробленими чи удосконаленими версіями машин, що розроблені в минулому столітті.

За час війни Україні було надано дуже великий та багатогранний перелік техніки, у тому числі й у забезпеченні транспортування піхоти, ця техніка була випробувана сучасною війною і

© Д. В. Кислиця, 2026

певною мірою можна оцінювати її ефективність у сучасних реаліях.

Мета роботи – розглянути сучасні зразки БМП. Виділити, які методи використовують для досліджень та покращень сучасних ЛБМ. Визначити напрям розвитку бойових машин піхоти та їх захисту в умовах розвитку сучасних способів ураження.

Сучасні зразки бойових машин піхоти. Серед сучасних бойових машин піхоти можна окреслити перелік зразків, що залишаються актуальними на сьогодні, однак окремої уваги заслуговують численні варіації цих платформ:

- «Bradley» (рис. 1) – є основною на озброєнні механізованих військ США з 1981 р., зараз підтримується та модифікується британським транснаціональним підприємством BAE Systems [1];



Рисунок 1 – Bradley M2A4E1

- «Marder» (рис. 2) – німецька машина родом з концерну Rheinmetall [2] та перебуває на озброєнні з 1971 р.;



Рисунок 2 – Marder 1A5

- «Lynx» (рис. 3) – німецьке сімейство нових машин, що були розроблені концерном Rheinmetall [2], та представлені вперше в 2016 р.;



Рисунок 3 – Lynx KF41

- «CV90» (рис. 4) – шведські машини від фірми Hägglunds, яка є частиною BAE Systems [1], та перебуває на озброєнні з 1994 р.;



Рисунок 4 – CV90 MkIV

- «Puma» (рис. 5) – німецька бойова машина останнього покоління, спільний проєкт концернів KNDS Deutschland [3] та Rheinmetall [2], на озброєнні з 2015 р.;



Рисунок 5 – Puma S1

- «K21» (рис. 6) – південно-кореїнська машина від Hanwha Aerospace [4], яка виготовляється з 2009 р.;



Рисунок 6 – K21

- «ASCOD» (рис. 7) – створена спільно австрійською фірмою Steyr-Daimler-Puch та іспанською Santa Bárbara Sistemas, наразі підтримується General Dynamics European Land Systems [5], та перебуває на озброєнні Австрії та Іспанії з 1996 р.



Рисунок 7 – ASCOD

- «FV510 Warrior» (рис. 8) – британська машина, розроблена компанією GKN, основна інформація розміщена на сайті британської армії

[6], перебуває на озброєнні Великої Британії з 1987 р.



Рисунок 8 – Warrior

- «Tulpar» (рис. 9) – турецька машина компанії Otokar [7], що перебуває на озброєнні збройних сил Туреччини з 2013 р.



Рисунок 9 – Tulpar

Розвиток озброєння та захисту. БМП пройшли довгий шлях удосконалення, вимоги до захисту подібних машин росли з роками.

Ранні модифікації БМП-1 та M2 Bradley розраховували на захист переважно від стрілецького озброєння та великокаліберних кулеметів калібру 12,7 мм. Вимоги до БМП були з урахуванням того, що вони будуть діяти разом з танками, та були би більш мобільними, ніж ці досить важкі машини.

Бойовий досвід машин США в різних частинах світу швидко показав уразливість цих машин до гранатометів та мін, тому світ відносно швидко почав переходити до динамічного захисту, композитної броні та навісних екранів у спробі підвищити захисні характеристики цих машин. Сучасні зразки, такі як «Puma», «CV90» та «Lynx», вже мають багат шарову броню, протимінний захист та системи активного захисту.

Паралельно з розвитком захисту також досить значні зміни відбуваються в переозброєнні. Через особливості конструкції та іншого призначення машини БМП не можуть ефективно використовувати танкові гармати. Ранні машини оснащувались переважно гарматами 20 мм та протитанковими ракетними комплексами (ПТРК) першого покоління. Сучасні машини вже мають на озброєнні 30 мм, 35 мм та 40 мм автоматичні гармати з сучасними зразками ПТРК, програмовані боєприпаси, автоматичний супровід цілі та інші покращення.

Сучасні методи розрахунку бойових машин та їх частин. Процес розробки та вдосконалення сучасних зразків військової техніки також

супроводжується суміжним використанням передових методів для розрахунку, а також програм, які використовують ці методи. Наприклад, широко використовуються програмні продукти ABAQUS чи комплекс програм Ansys з його популярними модулями LS-DYNA та AUTODYN.

Основний метод, що також використовується як підтвердження розрахунків, є експериментальний метод. Попри те, що більшість сучасних досліджень базуються переважно на чисельних методах, експеримент залишається ключовою складовою процесу підтвердження коректності розрахунків. Самі ж розрахунки, у свою чергу, спрямовані на зменшення кількості експериментів. Це важливо, оскільки експериментальні дослідження, хоч і є ефективними, залишаються відносно дорогими. Таким чином, цей метод є головним у процесі підтвердження справедливості результатів та їх адекватності.

Одним із популярних методів, який широко використовують для задач різної складності є метод скінченних елементів (МСЕ), або ж Finite Element Method (FEM). Особливо широко використовується Explicit Dynamics (явна динаміка), що цілком підходить для аналізу високошвидкісних та короточасних процесів, які відбуваються під час вибуху чи зіткнення снаряду з бронею. Суть методу полягає у розбитті складного об'єкту на скінченну кількість простих елементів, та має сітку, яка рухається разом із матеріалом.

Гідродинаміка згладження частинок (ГЗЧ), або Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) - один з чисельних методів, що на відміну від МСЕ більш зосереджений на моделюванні рідин та газів, та не має сітки. У дослідженні [10] було реалізовано перехід від МСЕ до ГЗЧ після перевищення визначених критеріїв руйнування, що можна характеризувати як гібридний метод.

Також ефективно використання емпіричної моделі Джонсона-Кука в дослідженнях [8, 15, 16], яку застосовують разом з іншими методами для прогнозування поведінки матеріалу при його деформації

Розрахунок балістичної стійкості широко поширений та є досить актуальним, статті [8–16] присвячені цій проблематиці та вдало застосовують різні методи для вирішення цих задач.

Досить актуальною темою зараз є композити, зокрема дослідження [8, 9, 13, 14] зосереджені на цьому. Також такій актуальній темі як кераміка приділяють увагу дослідження [10, 15]. Окрім цього, відносно нові дослідження, такі як [16], що приділяють увагу проблематиці, пов'язаній зі зв'язком між балістичними характеристиками та механічними властивостями. Однією з досить цікавих тем досі є використання перфорованих пластин [11], що також частково присутнє в дослідженні [14].

Окрім балістичної стійкості завжди актуальним було питання внутрішніх коливань, вібрацій, модальний аналіз, мінний захист та інші теми, пов'язані з конструкцією машини. Останні дослідження [17–27] розкривають різні аспекти цих

досліджень, використовуючи раніше згадані методи досліджень.

Дослідження [17–23] приділяють увагу проблемі захищеності днища. Модальний аналіз розкривається в сучасних дослідженнях [26–28].

Окрім тем, пов'язаних із захистом, також важливими є розрахунки різних частин машин, в тому числі, наприклад, пов'язаних зі стабільністю підвіски. Так, у дослідженні [29], описані процеси, що не впливають на захищеність в цілому, проте є досить важливими для живучості машини під час виходу з ладу критичних частин машини.

Тенденції розвитку захисту легкоброньованої техніки. Сучасний захист легкоброньованої техніки сильно залежить від засобів ураження, які присутні на полі бою. Таким чином, різні конфлікти в світі так чи інакше призводили до модернізації різних зразків техніки.

Одним із напрямів вдосконалення вже існуючих зразків є додатковий захист, який не сильно залежить від конструкції машини і є досить універсальним. Дослідження [30] приділяє увагу цьому питанню.

У роботі [31] підкреслюється, що захищеність бойових машин повинна включати також рішення щодо конструкції підвіски та оптимізацію ключових систем і їх розташувань так, щоб машина мала можливість евакуюватись при пошкодженні критичних вузлів.

Робота [32] досить добре розкриває раніше згадані виклики сучасних війн. У тому числі, що у сучасній війні є велика номенклатура засобів для ураження техніки.

Ранні зразки бронетехніки навіть не думали розробляти з урахуванням великої кількості загроз зверху корпусу. Лише після початку повномасштабної війни, в якій почали набирати популярність різні варіанти БпЛА, стала очевидна вразливість техніки до скидів різних боєприпасів. Засоби, якими раніше вражали техніку, тепер мають ще більш ефективні засоби доставки до цілі ураження.

Сьогодні рішення щодо захисту ЛБМ можна умовно привести до 3 рівнів:

- перший рівень – базова броня, тобто корпус, який закладається в машину під час її проектування;
- другий рівень – додатковий захист та екранування машини, що не сильно залежить від конструкції машини;
- третій рівень – активний захист, суть якого полягає в завчасному перехопленні різних засобів перед влучанням.

З урахування вищенаведеного, цілком можна зрозуміти переваги сучасних систем активного захисту та виявлення загроз.

Висновки. Таким чином, було розглянуто сучасні зразки БМП, в яких ще буде довгий шлях удосконалення для протидії новим методам ураження. Було також розглянуто методи, які супроводжують процес модернізації та проектування машин. Також проаналізовані тенденції, які спостерігаються на шляху розвитку захисту ЛБМ.

Список літератури

1. Офіційний сайт виробника, BAE Systems. URL: <https://www.baesystems.com/en-us> (дата звернення 07.02.2026)
2. Офіційний сайт виробника, Rheinmetall. URL: <https://www.rheinmetall.com/de> (дата звернення 07.02.2026)
3. Офіційний сайт виробника, KNDS Deutschland. URL: <https://knds.com/en> (дата звернення 07.02.2026)
4. Офіційний сайт виробника, Hanwha Aerospace. URL: <https://www.hanwhaaerospace.com> (дата звернення 07.02.2026)
5. Офіційний сайт виробника, General Dynamics European Land Systems. URL: <https://www.gdels.com> (дата звернення 07.02.2026)
6. Офіційний сайт Британської армії. URL: <https://www.army.mod.uk> (дата звернення 07.02.2026)
7. Офіційний сайт виробника, Otokar. URL: <https://defense.otokar.com.tr> (дата звернення 07.02.2026)
8. Alam, S., & Aboagye, P. (2024). Numerical Modeling on Ballistic Impact Analysis of the Segmented Sandwich Composite Armor System. *Applied Mechanics*, 5(2), 340-361. DOI:<https://doi.org/10.3390/applmech5020020>
9. Ding, L., Gu, X., Shen, P., Kong, X., & Zhou, Y. (2022). Dynamic Response of UHMW-PE Composite Armors under Ballistic Impact of Blunt Projectiles. *Materials*, 15(16), 5594. DOI:<https://doi.org/10.3390/ma15165594>
10. Zochowski, P., Bajkowski, M., Grygoruk, R., Magier, M., Burian, W., Pyka, D., Bocian, M., & Jamrozak, K. (2022). Comparison of Numerical Simulation Techniques of Ballistic Ceramics under Projectile Impact Conditions. *Materials*, 15(1), 18. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15010018>
11. Balos, S., Howard, D., Brezilianu, A., & Labus Zlatanović, D. (2021). Perforated Plate for Ballistic Protection—A Review. *Metals*, 11(4), 526. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11040526>
12. Nowakowski, M.; Kosiuczenko, K.; Viliš, J. Unmanned vehicle mobility improvement against ballistic threats during specialmissions: A simulation study. *Transp. Probl.* 2025,20, 139–151. DOI: 10.20858/tp.2025.20.1.12
13. Jia, D., Xu, Y., Wang, L., Zhu, J., Zhang, W. (2024). Study of the Ballistic Impact Behavior of Protective Multi-Layer Composite Armor. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 140(1), 171–199. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmescs.2024.046703>
14. M. Mosa, Fahem, Ali, Guthai, Achyuth Thumbalam "Experimental investigation of perforated multi-layered composite armor subjected to ballistic impact," *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*, vol. 17, no. 1, pp. 16-21, 2024. DOI: <https://doi.org/10.30772/qjes.2024.146005.1083>
15. Teoman, A., Göde, E., Çetin, B., Tonbul, K., Çalıřkan, U., & Ögünç, G. İ. (2024). Design of an add-on ceramic composite armour against 14.5 × 114 mm API/B32 projectile for the armoured vehicles and investigation of the ballistic performance of the armour. *Materials Research Express*, 11(4), 045202. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad40ff>
16. Li, D., Huang, F., Ren, B., Zhang, W., Xiong, J., Zhou, B., & Guo, X. (2024). Ballistic analysis of high-performance armor steel by numerical simulation. *Scientific Reports*, 14(1), 11466.

- DOI:<https://doi.org/10.1038/s41598-024-62482-5>
17. Li, M., Wang, X., Liu, H. *et al.* MultiObjective optimization of the design of a protective components to chassis protection module for unmanned armored vehicles. *Sci Rep* **15**, 6975 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91632-6>
 18. Glavšič, M.; Elek, P. Numerical Analysis of Mine Blast Action on an Armored Vehicle for Different V-Hull Geometries. *Sci. Tech.Rev.* 2020,70, 29–35. DOI: 10.5937/str2001029G
 19. D. Pyka, A. Kurzawa, P. Żochowski, M. Bajkowski, M. Magier, R. Grygoruk, M. Roszak, K. Jamrozak, and M. Bocian. Experimental and numerical reserach on additional vehicles protection against explosives, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 25:83, 2025. DOI:10.1007/s43452-025-01121-w
 20. Trajkovski, J., Perenda, J., & Kunc, R. (2018). Blast response of light armored vehicles (LAVs) with flat and V-hull floor. *Thin-Walled Structures*, 131, 238–244. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.06.040>
 21. Markose, A., & Lakshmana Rao, C. (2020). Effectiveness of polyurea coated steel plates in blast mitigation in vehicles. In R. Prakash, R. Suresh Kumar, A. Nagesha, G. Sasikala, & A. Bhaduri (Eds.), *Structural integrity assessment* (Lecture Notes in Mechanical Engineering). Springer. DOI:https://doi.org/10.1007/978-981-13-8767-8_12
 22. Lotfy, M., & Ezzeldin, M. (2025). Double densification effects of a new enhanced auxetic steel system on mitigating severe explosions. *Defence Technology*. Advance online publication. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.dt.2025.09.011>
 23. M. Pešić, N. Jović, V. Milovanović, D. Savić, A. Aničić, M. Živković, S. Savić, FEM Analysis of Anti-Mining Protection of Armored Vehicles. *Applied Engineering Letters*, 7(3), 2022: 89–99. DOI:<https://doi.org/10.18485/aletters.2022.7.3.1>
 24. Ткачук, М. А., Васильев, А. ., Грабовський, А. ., Ткачук, М. М., Набоков, А. ., Троценко, В. ., Соловей, В. ., Богач, А. . і Малакей, С. . (2025) «ВПЛИВ УДАРНОЇ ХВИЛІ НА ВТРАТУ СТІЙКОСТІ БРОНЕКОРПУСІВ ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН», *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР*, (1), с. 73–91. DOI:10.20998/2079-0775.2025.1.08
 25. Andika, Santosa, S. P., Widagdo, D., & Pratomo, A. N. (2024). Design and Multi-Objective Optimization of Auxetic Sandwich Panels for Blastworthy Structures Using Machine Learning Method. *Applied Sciences*, 14(23), 10831. DOI:<https://doi.org/10.3390/app142310831>
 26. Zafer, N. Vibration Analysis and Optimization of a Tracked Armored Vehicle. *Journal of Vibration Engineering Technologies*. DOI:<https://doi.org/10.1007/S42417-022-00739-X>
 27. Hryciów, Z., Małachowski, J., Rybak, P., & Wiśniewski, A. (2021). Research of Vibrations of an Armoured Personnel Carrier Hull with FE Implementation. *Materials*, 14(22), 6807. DOI:<https://doi.org/10.3390/ma14226807>
 28. Hryciów, Z., Wiśniewski, A., & Rybak, P. (2020). Experimental and numerical modal analysis of the military vehicle hull. *Advances in Military Technology*, 15(2), 379–391. DOI:<https://doi.org/10.3849/aimt.01427>
 29. Xu, H., Li, J., Liu, J., & Gu, B. (2023). Fatigue life analysis of balance elbow structure during firing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2460(1), 012028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2460/1/012028>
 30. Подригало, М. А., Баулін, Д. С., Горелишев, С. А., Манжура, С. А., Ільченко, М. І., Одейчук, М. П., Іванець, Г. В., & Віштак, І. В. (2022). Аналіз додаткового бронезахисту легкоброньованої техніки Збройних Сил України та іноземних держав. *Вісник машинобудування та транспорту*, 14(2), 89–96. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-89-96>
 31. Баган, В., Хаустов, Д., Настишин, Ю., & Костюк, В. (2025). Обґрунтування технічних рішень щодо підвищення захищеності бойових машин у системі заходів забезпечення їх живучості при веденні бойових дій. *Військово-технічний збірник*, 32, 103–112. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.32.2025.103-112>
 32. Дегтяренко, В. (2023). Особливості української бронетехніки: Випробування війною. *Молодий вчений*, 3(115), 33–40. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2023-3-115-6>

References (transliterated)

1. Ofitsiyni sait vyrobnyka, BAE Systems. URL: <https://www.baesystems.com/en-us> (data zvernennia 07.02.2026)
2. Ofitsiyni sait vyrobnyka, Rheinmetall. URL: <https://www.rheinmetall.com/de> (data zvernennia 07.02.2026)
3. Ofitsiyni sait vyrobnyka, KNDS Deutschland. URL: <https://knds.com/en> (data zvernennia 07.02.2026)
4. Ofitsiyni sait vyrobnyka, Hanwha Aerospace. URL: <https://www.hanwhaaerospace.com> (data zvernennia 07.02.2026)
5. Ofitsiyni sait vyrobnyka, General Dynamics European Land Systems. URL: <https://www.gdels.com> (data zvernennia 07.02.2026)
6. fitsiyni sait Brytanskoï armii. URL: <https://www.army.mod.uk> (data zvernennia 07.02.2026)
7. Ofitsiyni sait vyrobnyka, Otokar. URL: <https://defense.otokar.com.tr> (data zvernennia 07.02.2026)
8. Alam, S., & Aboagye, P. (2024). Numerical Modeling on Ballistic Impact Analysis of the Segmented Sandwich Composite Armor System. *Applied Mechanics*, 5(2), 340-361. DOI:<https://doi.org/10.3390/applmech5020020>
9. Ding, L., Gu, X., Shen, P., Kong, X., & Zhou, Y. (2022). Dynamic Response of UHMW-PE Composite Armors under Ballistic Impact of Blunt Projectiles. *Materials*, 15(16), 5594. DOI:<https://doi.org/10.3390/ma15165594>
10. Zochowski, P., Bajkowski, M., Grygoruk, R., Magier, M., Burian, W., Pyka, D., Bocian, M., & Jamrozak, K. (2022). Comparison of Numerical Simulation Techniques of Ballistic Ceramics under Projectile Impact Conditions. *Materials*, 15(1), 18. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15010018>
11. Balos, S., Howard, D., Brezulanu, A., & Labus Zlatanović, D. (2021). Perforated Plate for Ballistic Protection—A Review. *Metals*, 11(4), 526. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11040526>
12. Nowakowski, M.; Kosiuczenko, K.; Viliš, J. Unmanned vehicle mobility improvement against ballistic threats during specialmissions: A simulation study. *Transp. Probl.* 2025,20, 139–151. DOI: 10.20858/tp.2025.20.1.12
13. Jia, D., Xu, Y., Wang, L., Zhu, J., Zhang, W. (2024). Study of the Ballistic Impact Behavior of Protective

- Multi-Layer Composite Armor. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 140(1), 171–199. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmescs.2024.046703>
14. M. Mosa, Fahem, Ali, Guthai, Achyuth Thumbalam "Experimental investigation of perforated multi-layered composite armor subjected to ballistic impact," *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*, vol. 17, no. 1, pp. 16-21, 2024. DOI: <https://doi.org/10.30772/qjes.2024.146005.1083>
 15. Teoman, A., Göde, E., Çetin, B., Tonbul, K., Çalışkan, U., & Ögünç, G. İ. (2024). Design of an add-on ceramic composite armour against 14.5 × 114 mm API/B32 projectile for the armoured vehicles and investigation of the ballistic performance of the armour. *Materials Research Express*, 11(4), 045202. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad40ff>
 16. Li, D., Huang, F., Ren, B., Zhang, W., Xiong, J., Zhou, B., & Guo, X. (2024). Ballistic analysis of high-performance armor steel by numerical simulation. *Scientific Reports*, 14(1), 11466. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62482-5>
 17. Li, M., Wang, X., Liu, H. *et al.* MultiObjective optimization of the design of a protective components to chassis protection module for unmanned armored vehicles. *Sci Rep* 15, 6975 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91632-6>
 18. Glavšić, M.; Elek, P. Numerical Analysis of Mine Blast Action on an Armored Vehicle for Different V-Hull Geometries. *Sci. Tech.Rev.* 2020,70, 29–35. DOI: 10.5937/str2001029G
 19. D. Pyka, A. Kurzawa, P. Żochowski, M. Bajkowski, M. Magier, R. Grygoruk, M. Roszak, K. Jamroziak, and M. Bocian. Experimental and numerical research on additional vehicles protection against explosives, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 25:83, 2025. DOI:10.1007/s43452-025-01121-w
 20. Trajkovski, J., Perenda, J., & Kunc, R. (2018). Blast response of light armoured vehicles (LAVs) with flat and V-hull floor. *Thin-Walled Structures*, 131, 238–244. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.06.040>
 21. Markose, A., & Lakshmana Rao, C. (2020). Effectiveness of polyurea coated steel plates in blast mitigation in vehicles. In R. Prakash, R. Suresh Kumar, A. Nagesha, G. Sasikala, & A. Bhaduri (Eds.), *Structural integrity assessment* (Lecture Notes in Mechanical Engineering). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-8767-8_12
 22. Lotfy, M., & Ezzeldin, M. (2025). Double densification effects of a new enhanced auxetic steel system on mitigating severe explosions. *Defence Technology*. Advance online publication. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2025.09.011>
 23. M. Pešić, N. Jović, V. Milovanović, D. Savić, A. Aničić, M. Živković, S. Savić, FEM Analysis of Anti-Mining Protection of Armored Vehicles. *Applied Engineering Letters*, 7(3), 2022: 89–99. DOI: <https://doi.org/10.18485/aeletters.2022.7.3.1>
 24. Tkachuk, M. A., Vasyliiev, A., Hrabovskiy, A., Tka-chuk, M. M., Nabokov, A., Trotsenko, V., Solovei, V., Bohach, A. i Malakei, S. (2025) «VPLYV UDAR-NOI KhVYLI NA VTRATU STIIKOSTI BRONEKOR-PUSIV LEHKOBRONOVANYKh MASHYN», *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: Mashynoznavstvo ta SAPR, (1), s. 73–91. DOI:10.20998/2079-0775.2025.1.08
 25. Andika, Santosa, S. P., Widagdo, D., & Pratomo, A. N. (2024). Design and Multi-Objective Optimization of Auxetic Sandwich Panels for Blastworthy Structures Using Machine Learning Method. *Applied Sciences*, 14(23), 10831. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142310831>
 26. Zafer, N. Vibration Analysis and Optimization of a Tracked Armored Vehicle. *Journal of Vibration Engineering Technologies*. DOI: <https://doi.org/10.1007/S42417-022-00739-X>
 27. Hryciów, Z., Małachowski, J., Rybak, P., & Wiśniewski, A. (2021). Research of Vibrations of an Armoured Personnel Carrier Hull with FE Implementation. *Materials*, 14(22), 6807. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14226807>
 28. Hryciów, Z., Wiśniewski, A., & Rybak, P. (2020). Experimental and numerical modal analysis of the military vehicle hull. *Advances in Military Technology*, 15(2), 379–391. DOI: <https://doi.org/10.3849/aimt.01427>
 29. Xu, H., Li, J., Liu, J., & Gu, B. (2023). Fatigue life analysis of balance elbow structure during firing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2460(1), 012028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2460/1/012028>
 30. Podryhalo, M. A., Baulin, D. S., Horielyshev, S. A., Ma-nzhura, S. A., Ilchenko, M. I., Odeichuk, M. P., Ivanets, H. V., & Vishtak, I. V. (2022). Analiz dodatkovoho brone-zakhystu lehkobronovanoi tekhniky Zbroinykh Syl Ukrainy ta inozemnykh derzhav. *Visnyk mashynobuduvannya ta transportu*, 14(2), 89–96. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-89-96>
 31. Bahan, V., Khaustov, D., Nastyshyn, Yu., & Kostiuik, V. (2025). Obgruntuvannya tekhnichnykh rishen shchodo pidvy-shchennia zakhyshchenosti boiovykh mashyn u systemi zakhodiv zabezpechennia yikh zhyvuchosti pry vedenni boiovykh dii. *Vii-skovo-tekhnichnyi zbirnyk*, 32, 103–112. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.32.2025.103-112>
 32. Dehtiarenko, V. (2023). Osoblyvosti ukrainskoi brone-tekhniky: Vprobuвання viinoiu. *Molodyi vchenyi*, 3(115), 33–40. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2023-3-115-6>

Надійшла (received) 24.03.2026

Стаття прийнята до друку 20.05.2026

Опублікована 29.05.2026

Відомості про авторів /About authors

Кислиця Денис Валерійович / Kyslytsia Denys – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м Харків, Україна; ORCID <https://orcid.org/0009-0007-9553-1865>; e-mail: kislitsa2019@gmail.com