

*А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, Г. В. ТКАЧУК, А. Ю. ВАСИЛЬЄВ, М. А. ТКАЧУК, А. М. КОБА,
А. В. НАБОКОВ, Г. І. ЦИМБАЛ, В. О. КАРПОВ, О. М. РІКУНОВ, А. С. БОГАЧ*

ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ БРОНЕКОРПУСІВ ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН ІЗ НОВІТНІХ МАТЕРІАЛІВ

У роботі описано загальний підхід до обґрунтування прогресивних технічних рішень бронекорпусів легкоброньованих машин із новітніх матеріалів. Мова йде про високолеговані сталі, сплави різних кольорових металів, керамічні композиції, пластики, ткани та неткани і мережеві матеріали, матеріали із покриттями та поверхнево зміцнені із застосуванням прогресивних технологій. Із цією метою залучено та адаптовано математичні та чисельні моделі напружено-деформованого стану бронекорпусів легкоброньованих машин, побудовані на основі створення багатокомпонентних структур. Аналіз процесів і станів та характеристик цих конструкцій дав основу для створення бази даних, які можуть бути покладені в обґрунтування прогресивних технічних рішень бронекорпусів легкоброньованих машин за критеріями динамічної міцності, жорсткості та захищеності. Зокрема, визначаються параметри внутрішньої силової структури, які дають можливість різко знизити напруження та переміщення від дії реактивних сил віддачі при здійсненні пострілів із озброєння бойового модуля. Також забезпечується відлаштування від резонансних режимів збудження при багатоімпульсному збудженні. У результаті досягається зниження маси бронекорпуса. Застосування розробленого підходу створює можливість економії термінів проєктних досліджень та досягнення підвищених тактико-технічних характеристик перспективних легкоброньованих машин, що проєктуються та модернізуються. На прикладі тестового варіанту багатоцільового тягача досягається поліпшення динамічних характеристик, міцності, жорсткості та стійкості бронекорпусу, виготовленого із композиційного матеріалу.

Ключові слова: бронекорпус; легкоброньована машина; напружено-деформований стан; динамічні характеристики; міцність; жорсткість; стійкість; композит; проєктування

*A. HRABOVSKIY, H. TKACHUK, A. VASYLIEV, M. A. TKACHUK, A. KOBA,
A. NABOKOV, H. TSYMBAL, V. KARPOV, O. RIKUNOV, A. BOHACH*

TECHNICAL SOLUTIONS OF THE ARMORED HULL LIGHTLY ARMORED VEHICLE FROM THE LATEST MATERIALS

The paper describes a general approach to justifying progressive technical solutions of the armored hull lightly armored vehicle from the latest materials. We are talking about high-alloy steels, alloys of various non-ferrous metals, ceramic compositions, plastics, woven and non-woven and network materials, materials with coatings and surface-strengthened using advanced technologies. For this purpose, mathematical and numerical models of the stress-strain state have been used and adapted armored hull lightly armored vehicle, built on the basis of creating multi-component structures. Analysis of processes and states and characteristics of these structures provided the basis for creating a database that can be used to justify progressive technical solutions of the armored hull lightly armored vehicle by the criteria of dynamic strength, rigidity and protection. In particular, the parameters of the internal power structure are determined, which make it possible to sharply reduce the stress and displacement from the action of reactive recoil forces when firing from the armament of the combat module. Also, detuning from resonant excitation modes during multi-pulse excitation is ensured. As a result, a mass reduction is achieved armored hull. The application of the developed approach creates the opportunity to save time for design research and achieve improved tactical and technical characteristics of promising lightly armored vehicle, which are being designed and modernized. Using the example of a test version of a multi-purpose tractor, improvements in dynamic characteristics, strength, rigidity and stability are achieved for the armored hull, made of composite material.

Keywords: armored hull; lightly armored vehicle; stress-strain state; dynamic characteristics; strength; rigidity; stability; composite; design

Вступ. Як зазначено у роботі [1], практика бойових дій 2022–2026 рр. проти країни-агресора виявила низку особливостей стосовно застосування бронетехніки. Своєю чергою, ця обставина зумовила неможливість застосування традиційних варіантів технічних рішень бронекорпусів бойових броньованих машин із залученням відомих бронесталей, кольорових металів, кераміки, пластиків та композитних структур на їх основі.

Відповідно, звертається увага на застосування новітніх матеріалів. Із метою відпрацювання розрахункових моделей та методів досліджень бронекорпусів із цих новітніх матеріалів у роботі [1] здійснені відповідні розробки та дослідження фрагментів і тестових конструкцій бронекорпусів. На продовження цих досліджень здійснені додаткові дослідження процесів, станів та характеристик тестового

бронекорпусу багатоцільового тягача із новітнього композитного матеріалу, який підсилюється внутрішньою структурою із традиційною конструкційної сталі. Деякі результати досліджень описані у цій роботі.

Аналіз існуючих моделей і методів дослідження реакції тонкостінних конструкцій на дію навантажень. У роботах [1, 2] зазначено, що бронекорпуси вітчизняних легкоброньованих машин (ЛБМ) піддаються дії чинників ураження та силового збурення зі все зростаючою інтенсивністю. При цьому традиційні рішення бронекорпусів у вигляді просторової зварної конструкції із бронепанелей, виготовлених із гомогенних матеріалів, вичерпали можливості

© А. В. Грабовський, Г. В. Ткачук, А. Ю. Васильєв,
М. А. Ткачук, А. М. Коба, А. В. Набоков,
Г. І. Цимбал, В. О. Карпов, О. М. Рікунов,
А. С. Богач, 2026

задоволення усіх вимог до динамічної міцності, захищеності, жорсткості тощо. Відповідно, привертає увагу застосування композиційних матеріалів. Зокрема, у багатьох випадках можуть розглядатися як перспективні т.з. «сендвіч-бронепанелі», що містять композиції «сталь – кераміка – сталь», «сталь – пластик – сталь», «сталь– гума – сталь» та інші варіанти» [1, 2].

Застосуванню та дослідженню службових властивостей конструкцій із неоднорідних, сотових, підкріплених та композиційних матеріалів присвячено велику кількість робіт [3–9]. У цих роботах мова йде про міцність матеріалів, конструкцій та методів їх розрахунку. Детальний огляд цих робіт викладено у [1]. Зокрема, зазначається, що значна увага для випадку транспортних засобів спеціального призначення приділяється питанням балістичного та протимінного захисту. Крім того, привертається увага забезпеченню захищеності бойових машин [10–12].

Також становить інтерес дослідження шаруватих конструкцій [13], визначення ефективних характеристик матеріалів [14–16].

Стосовно аналізу деформування шаруватих конструкцій аерокосмічної техніки при багатофакторному навантаженні, то у [17] зазначено, що «широке застосування конструкцій з композиційних матеріалів пов'язані з їх поліпшеними, порівняно однорідними характеристиками. Завдяки високим якимостям міцності і підвищеній жорсткості у поєднанні з малою масою композиційні матеріали широко використовуються в космічному, авіа- і суднобудуванні, транспортному машинобудуванні» [18–20].

Пов'язаною із тематикою, що розглядається, є проблематика захисних елементів бронезишетів [20], зокрема, стосовно керамічних бронепластин. Зазначено, що для бронеплит «найчастіше використовуються такі види кераміки: алюмінієвий оксид (Al_2O_3); карбід кремнію (SiC); карбід бору (B_4C). На деякі керамічні бронеплити може наноситися додаткове захисне покриття для підвищення їх стійкості до зношування і додаткового захисту від механічних пошкоджень. Завершальним етапом є інтеграція керамічних бронеплит із композитними матеріалами, такими як арамідне волокно або надвисокомолекулярний поліетилен. Це забезпечує додаткову амортизацію і захист» [20].

Окремий пласт проблем, підходів, моделей та методів досліджень композитних структур, у т. ч. – функціонально-градієнтних матеріалів, висвітлено у роботах [21–24].

Також у [1] зазначено, «що окрім металів, сплавів, кераміки, пластмас та композитів із їх поєднанням, у сучасних конструкціях широко застосовуються нетрадиційні матеріали: ткани,

неткані та мережеві волоконні матеріали. Для аналізу їх поведінки будуються моделі, що становлять поєднання одновимірних структур (волокон) у 3D областях. Один із варіантів, що має практичну застосовність – мережеві структури, які не занурені у якусь матрицю. .. При цьому розроблені та розвинені моделі поведінки такого типу матеріалів викладені у [25–32]» [1].

У роботі [1] здійснено розробку нового підходу до обґрунтування прогресивних технічних рішень ЛБМ на основі моделювання процесів, станів і характеристик їхніх бронекорпусів, виготовлених із новітніх матеріалів. Зокрема, досліджені тестові бронекорпуси із «сендвіч-бронепанелей», тобто із багажшарових матеріалів.

На розвиток розробленого підходу у цій роботі досліджується вплив на характеристики таких бронекорпусів підсилення їх внутрішньої структури.

Це становить мету цієї роботи.

Розрахункові дослідження процесів, станів і характеристик тестових конструкцій бронекорпусу багатоцільового тягача. Дослідження здійснюються на прикладі тестового варіанту бронекорпусу багатоцільового тягача типу МТ-ЛБ, попередньо дослідженого із базовим набором внутрішньої силової структури [1].

Досліджено три варіанта конструктивного виконання досліджуваного корпусу (рис. 1). Тут товщини панелей – 6 мм, силових елементів – 3 мм (на рис. 1 виділено кольором).

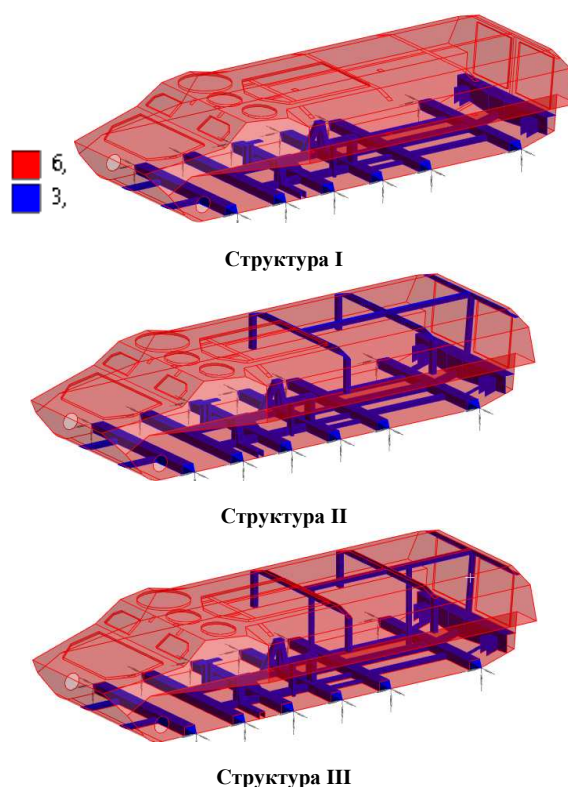
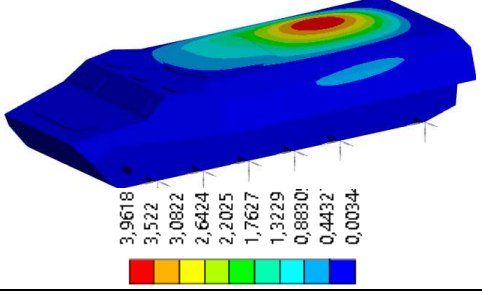
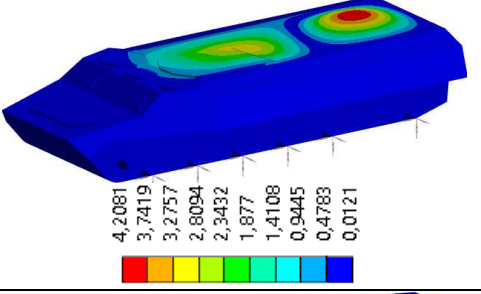
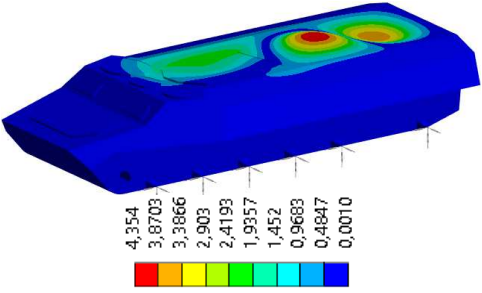
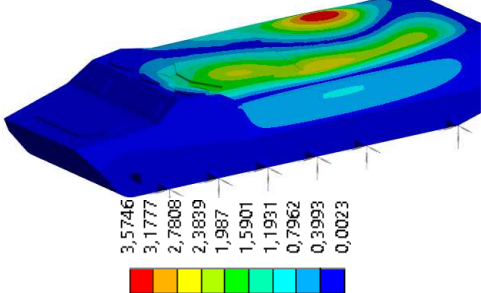
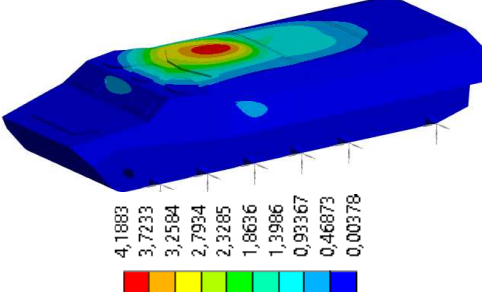
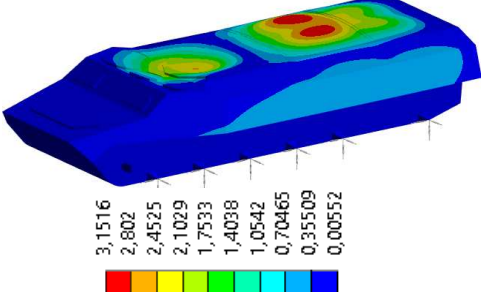
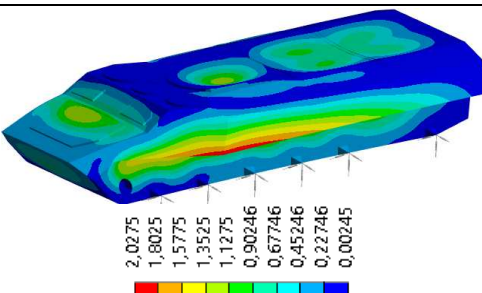
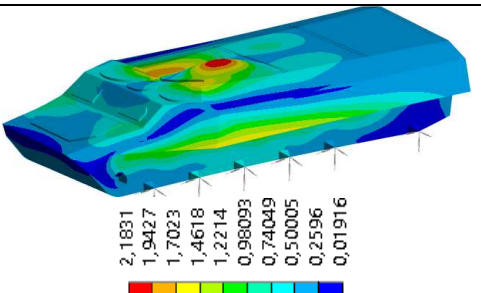
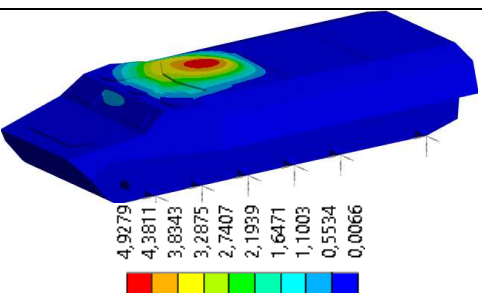
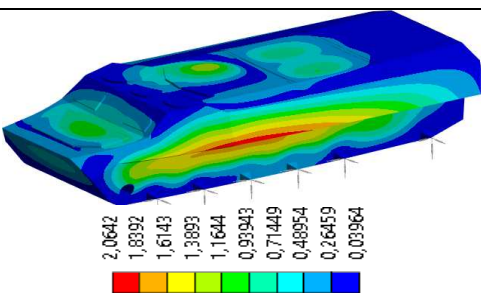


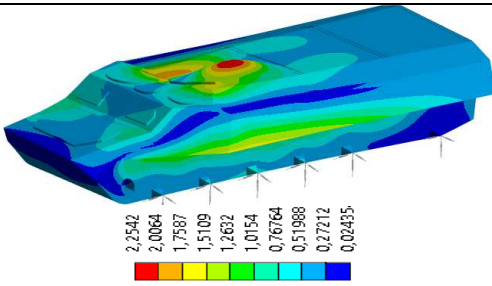
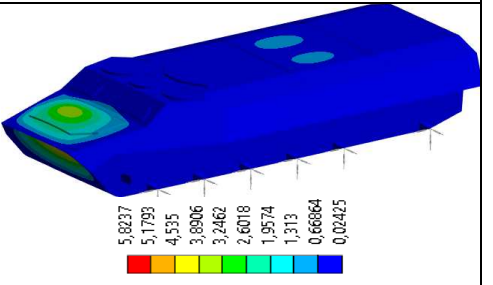
Рисунок 1 – Геометрична модель корпусу МТ-ЛБ із різними варіантами підсилення

Визначається напружено-деформований стан та власні коливання і стійкість тестових варіантів

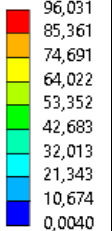
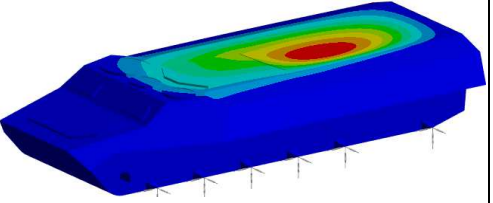
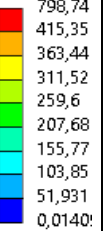
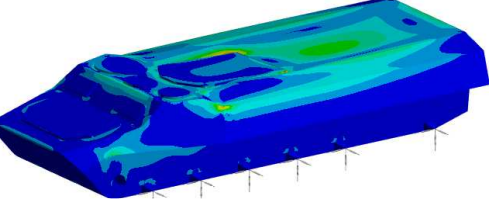
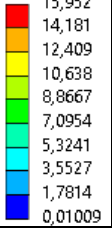
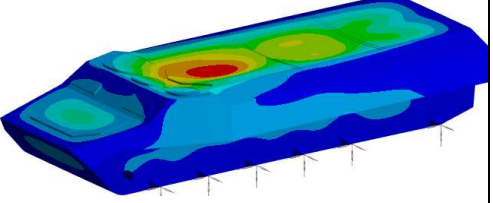
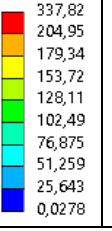
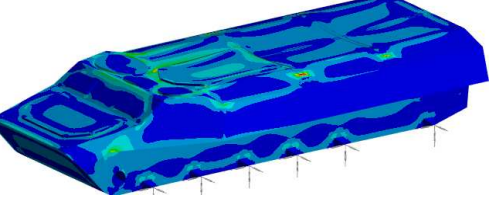
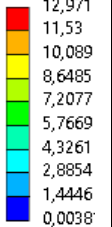
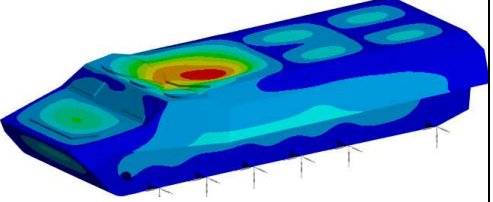
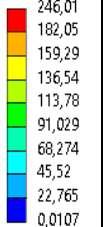
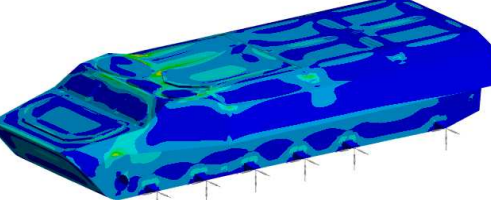
бронекорпусу МТ-ЛБ (рис. 2–10).

Таблиця 1 – Власні частоти і форми коливань тестового бронекорпусу МТ-ЛБ для різних структур

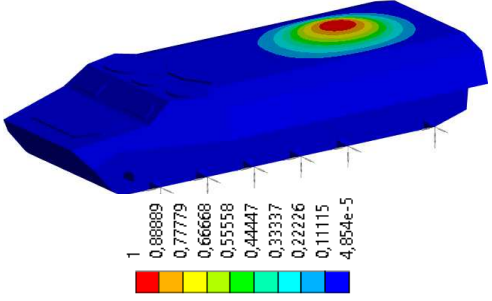
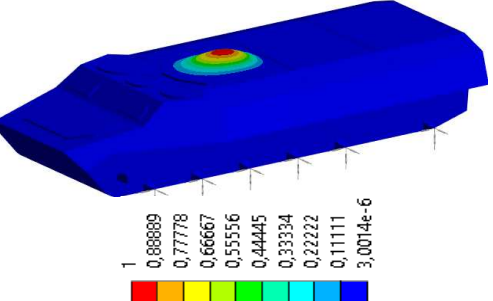
Деформаційна власна форма, Гц	Власна форма коливань	Деформаційна власна форма, Гц	Власна форма коливань
структура I			
1/10,11		2/14,84	
3/19,29		4/21,1	
структура II			
1/22,96		2/28,95	
3/33,67		4/34,52	
структура III			
1/24,82		2/32,94	

Деформаційна власна форма, Гц	Власна форма коливань	Деформаційна власна форма, Гц	Власна форма коливань
структура III			
3/34,61		4/37,47	

Таблиця 2 – Компоненти напружено-деформованого стану від зовнішнього тиску 10 кПа тестового бронекорпусу МТ-ЛБ для різних структур

Повні переміщення (мм)		Еквівалентні напруження (МПа)	
структура I			
			
структура II			
			
структура III			
			

Таблиця 3 – Форми втрати стійкості тестового бронекорпусу МТ-ЛБ для різних структур

№/коэф. запасу	Форма втрати стійкості	№/коэф. запасу	Форма втрати стійкості
структура I		структура II	
1/0,51		1/2,66	

№/коэф. запасу	Форма втрати стійкості	№/коэф. запасу	Форма втрати стійкості
	структура I		структура II
2/0,79		2/3,76	
3/1,04		3/4,79	
	структура III		
1/3,33		2/5,26	
3/6,42			

Аналіз результатів та висновки.

Розроблений та описаний і застосований у роботі підхід до аналізу напружено-деформованого стану, власних коливань та стійкості тестового бронекорпусу багатоцільового тягача дає підстави відзначити такі закономірності та висновки.

1. За своєю природою новітні композиційні матеріали потенційно позитивно впливають на рівень захищеності бронекорпусів бойових броньованих машин, на динамічну міцність, жорсткість та стійкість до дії надлишкового тиску ударної хвилі. Разом із тим ці критерії задовольняються різною мірою при варіюванні складу, структури та властивостей матеріалів, що формують композицію. Безперечно, на перший план виступає критерій захищеності від дії різних типів боєприпасів. Але після його задоволення постають інші проблеми, зокрема, стосовно динамічної міцності (від дії статичних, динамічних та поліімпульсних сил), жорсткість (бажано мінімізувати збурення у канали наведення та стабілізації озброєння із-за деформування

елементів підбаштового листа, на якому розміщений бойовий модуль) та стійкість до дії надлишкового тиску ударної хвилі (наприклад, від фугасних боєприпасів). Відповідно, необхідне залучення альтернативних варіантів удосконалення проектно-технологічних рішень бронекорпусів задля задоволення множині зазначених критеріїв.

2. Як засвідчили результати здійсненого комплексу досліджень, на міцнісні, жорсткісні, динамічні та стійкісні характеристики бронекорпусу достатньо сильно впливає раціональне посилення його внутрішньої силової структури, виконаної із традиційних конструкційних матеріалів. Зокрема, відчутний позитивний ефект чинять установки підсилюючих швелерів під підбаштовим листом, а також – вертикальних стійок між нижнім та верхнім поясом бронекорпусу. При цьому ефект посилюється при суміщенні цих двох заходів.

3. У цілому слід зазначити, що різні складові тактико-технічних характеристик бронемашин по-

різному реагують на ті чи інші варіанти технічних рішень бронекорпусів. Попри те, що застосування традиційних гомогенних бронематеріалів для виготовлення цих бронекорпусів стикається із суттєвими перепонами, разом із тим пряме механічне їх заміщення новітніми композиційними матеріалами не є найбільш раціональним рішенням. Більш прогресивним варіантом є поєднання новітніх матеріалів для виготовлення бронепанелей та традиційних – для силової внутрішньої структури. При цьому ці обидві складові бронекорпусу слід обґрунтувати у ході дослідження процесів, станів та характеристик, причому при їх (тобто зазначених складових) сумісному варіюванні. А критеріями і обмеженнями у ході синтезу технічних рішень бронекорпусів виступають бажані рівні компонент тактико-технічних характеристик бронемашин і фізико-механічні властивості матеріалів (як новітніх, так і традиційних).

Таким чином, розроблений удосконалений підхід може бути застосований до здійснення проектних досліджень, який може бути застосованим при розробці бронекорпусів легкоброньованих машин із підвищеними тактико-технічними характеристиками.

Список літератури

1. Ткачук М. А., Грабовський А. В., Ткачук М. М., Васильєв А. Ю., Коба А. М., Троценко В. В., Кислиця Д. В., Набоков А. В., Льозний О. С., Рікунов О. М., Шаталов О. Є. Методологія проектних досліджень бронекорпусів легкоброньованих машин із нетрадиційних, поверхнево зміцнених матеріалів та композицій. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР*. 2026. №1. С. 133–151. doi: 10.20998/2079-0775.2026.1.13
2. Грабовський А.В., Ткачук М.М., Васильєв А.Ю., Ткачук М.А., Коба А. М., Карпов В. О., Троценко В.В., Богач А.С., Набоков А.В., Соловей В.Ю., Рікунов О.М. Забезпечення підвищених тактико-технічних характеристик легкоброньованих машин на основі визначення динамічної міцності бронекорпусів із гомогенних та композиційних матеріалів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР*. 2025. №1. С. 27–46. doi: 10.20998/2079-0775.2025.1.04
3. Davydovskiy L., Bisyk S. (2016). Formation of requirements for anti-mine energy-absorbing seats of armored combat vehicles. *Collection of Sciences. Proceedings of the Central Research Institute of Weapons and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine*, Kyiv. Iss. 2 (61), pp. 18–30.
4. Bisyk S.P., Davydovskiy L.S., Chepkov I.B., et al. (2016). Theoretical evaluation of mine resistance of multipurpose tactical vehicle Kozak2. *Weapons and military equipment*, no. 1(9), pp. 26–31. doi: [10.34169/2414-0651.2016.1\(9\).26-31](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2016.1(9).26-31)
5. Shahravi S., Rezvani M.J., Jahan A. (2019). Multi-response Optimization of Grooved Circular Tubes Filled with Polyurethane Foam as Energy Absorber. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, no. 12 (1), pp. 133–149.
6. Davydovs'kyi L.S., Bisyk S.P., Chepkov I.B. et al. (2020). Alternatives of Energy Absorption Element Design Parameters for an Armored Combat Vehicle Seat Under Explosive Loading. *Strength Mater.* <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00140-7>
7. Chepkov I. B., Lapitsky S. V., Kuchinskiy A. V., Kuchinska O. B., Zirka M. V., Zvershkhovskiy I. V., Hurnovich A. V., Dokuchaev O. V., Andriyenko A. M., Oliarnik B. O. (2024). Experimental Studies on the Effect of Destructive Reagents on Metal Structural Elements. *Powder metallurgy industry and managerial economics*. vol. 63, pp.117–122. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11106-024-00443-3>
8. Чепков І. Б. Роль та місце матеріалознавства у створенні новітнього озброєння та військової техніки Збройних Сил України. *Вісник Національної академії наук України*. 2023. № 6. С. 73–83. DOI: 10.15407/visn2023.06.073
9. Chepkov I. B., Hurnovych A. V., Lapyts'kyi S. V., Oliiarnyk B. O., Trofymenko V. H., Maistrenko O. A. (2020). Method of Conversion for the Ballistic Coefficient of Bullets. *Strength of Materials*. Volume 52, pp. 419–422. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00193-8>
10. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хоменко В. П. Дослідження конструктивних особливостей та тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин типу MRAP. *Системи озброєння і військова техніка*. Харків. 2018. № 1 (53). С. 7–19.
11. Maystrenko A. L., Kushch V. I., Pashchenko E. A., Kulich V. G., Neshpor O. V., Bisyk S. P.. (2020). Ceramic Armour for Armoured Vehicles Against Large-Calibre Bullets. *Problemy Mechatroniki: uzbrojenie, lotnictwo, inzynieria bezpieczeŃstwa*. Vol. 11, no. 1 (39). Strony 9-16. DOI: 10.5604/01.3001.0014.0279
12. Сливінський О.А., Бісик С. П., Чепков І.Б., Васківський М.І., Чернозубенко О.В. Проблеми виготовлення зварних бронекорпусів вітчизняних бойових броньованих машин. *Озброєння та військова техніка*. 2017. №4. С. 29-38. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=WqIer8gAAAJ&cstart=20&pagesize=80&sortby=pubdate&citation_for_view=WqIer8gAAAJ:hFOr9nPyWt4C
13. Кривенко О. П., Лізунов П. П., Ворона Ю. В., Калашніков О. Б. Моделювання термопружних властивостей композитного матеріалу в задачах стійкості багатопарових оболонок. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2023. № 54. С. 77–89, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.54.77-89
14. Баженов В. А., Кривенко О. П. *Стійкість і коливання пружних неоднорідних оболонок при термосилових навантаженнях*. Київ: Каравела. 2020. 187 с.
15. Krivenko O. P., Lizunov P. P., Vorona Yu. V., Kalashnikov O. B. (2023). A Method for Analysis of Nonlinear Deformation, Buckling, and Vibrations of Thin Elastic Shells of an Inhomogeneous Structure. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*. Kyiv: KNUBA. Issue 110, pp. 131–149.

16. Smirnova Y., Huriia I., Loboda P. (2021). Liquid phase fabrication technology of layered Ti/Al composite. *U.P.B. Scientific bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*. Vol. 83, iss. 4, pp. 273–282. URL: https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rezb3b_447954.pdf
17. Сметанкіна Н. В., Місюра С. Ю., Місюра Є. Ю. Аналіз деформування шаруватих конструкцій аерокосмічної техніки при багатофакторному навантаженні. *Математичні проблеми технічної механіки – 2024 : матеріали міжнародної наукової конференції, 18-19, 22 квітня 2024 р. : тези допов.* Дніпро. 2024. 000С. 43–45. <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/32847>
18. Smetankina N., Ugrimov S., Kravchenko I., Ivchenko D. (2020). Simulating the process of a bird striking a rigid target. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. pp. 711–721. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_71
19. Шупиков А. Н., Бузько Я. П., Сметанкіна Н. В., Угримов С. В. *Нестационарные колебания многослойных пластин и оболочек и их оптимизация*. Харьков. ХНЭУ, 2004. 252с.
20. *Керамічні бронеплити – технологічна еволюція захисту*. Електронний ресурс. <https://balistyka.ua/articles/keramichni-broneplyty-tekhnologichna-evolyutsiya-zakhystu>. 01.07.2024
21. Бурлаєнко В. М., Львов Г. І., Дімітрова–Бурлаєнко С. Д. Дослідження стійкості метал-матричних композитних балок змінного поперечного перерізу з аксіальноградієнтним армуванням. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР*. 2025. №2. С. 26–34. DOI:<https://doi.org/10.20998/2079-0775.2025.2.04>
22. Burlayenko V. N., Kouhia R., Dimitrova S. D. (2024). Free vibration analysis of curvilinearly tapered axially functionally graded material beams. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app14156446>
23. Burlayenko V. N., Kouhia R., Dimitrova S. D. (2024). Free vibration analysis of curvilinearly tapered axially functionally graded material beams. *Applied Sciences*, vol. 14, no. 15, pp. 6446. <https://doi.org/10.3390/app14156446>
24. Altenbach H., Altenbach J., Kissing W. (2018). *Mechanics of Composite Structural Elements*, 2nd edn. Springer, Singapore
25. Tkachuk M., Tkachuk A. (2024). Large deformation of cable networks with fiber sliding as a second-order cone programming. *International Journal of Solids and Structures*, vol. 298, pp. 112848. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2024.112848>
26. Kanno Y. *Nonsmooth Mechanics and Convex Optimization*. 9781420094244, CRC Press (2011). URL <https://books.google.se/books?id=52XMBQAAQBAJ>
27. Ткачук М. М. Принцип мінімуму додаткової енергії для кабельних мереж відносно векторної змінної сили. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР*. 2022. №1. С. 85–90. doi: 10.20998/2079-0775.2022.1.09
28. Tkachuk M., Linder C. (2012). The maximal advance path constraint for the homogenization of materials with random network microstructure. *Phil. Mag.* 92 (22). P. 2779–2808. DOI: 10.1080/14786435.2012.675090
29. Kanno Y., Ohsaki M. (2006). Contact analysis of cable networks by using second-order cone programming. *SIAM J. Sci. Comput.* vol. 27 (6), pp. 2032–2052. <https://doi.org/10.1137/S106482750343194>
30. Negi V., Picu R. C. (2019). Mechanical behavior of cross-linked random fiber networks with inter-fiber adhesion. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. vol. 122, pp. 418–434. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.11.003>
31. Tkachuk M. M. (2022). Elastic Homogenization of Materials with Composite Network Structures. Springer Nature link. Published: 10 June 2022 Volume 263, pages 104–119, DOI:10.1007/s10958-022-05910-z
32. Ткачук М. М. Метод пружної гомогенізації бімодальних мереж. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР*. 2019. № 7. С. 107–115. <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2019.7.17>

References (transliterated)

1. Tkachuk M.A., Hrabovskyi A.V., Tkachuk M.M., Vasyliiev A.Yu., Koba A. M., Trotsenko V.V., Kyslytsia D. V., Nabokov A. V., Loznyi O. S., Rikunov O. M., Shatalov O. Ye. Metodolohiia proiektnykh doslidzhen bronekorpusiv lehkobronovanykh mashyn iz netradytsiinykh, poverkhnevo zmitsnenykh materialiv ta kompozytsii. [Project research methodology armored hulls of lightly armored vehicles from unconventional, surface-strengthened materials and compositions]. *Visnyk NTU «KhPI». Serii: Mashynoznavstvo ta SAPR*, 2026, no.1, pp. 133–151. doi: 10.20998/2079-0775.2026.1.13
2. Hrabovskyi A.V., Tkachuk M.M., Vasyliiev A.Yu., Tkachuk M.A., Koba A. M., Karpov V. O., Trotsenko V.V., Bohach A.S., Nabokov A.V., Solovei V.Yu., Rikunov O.M. Zabezpechennia pidvyshchenykh taktyko-tekhnichnykh kharakterystyk lehkobronovanykh mashyn na osnovi vyznachennia dynamichnoi mitsnosti bronekorpusiv iz homohennykh ta kompozytsiinykh materialiv [Ensuring increased tactical and technical characteristics of lightly armored vehicles based on determining the dynamic strength of armored hulls made of homogeneous and composite materials]. *Visnyk NTU «KhPI». Serii: Mashynoznavstvo ta SAPR*, 2025, no.1, pp. 27–46. doi: 10.20998/2079-0775.2025.1.04
3. Davydovskiy L., Bisyk S. (2016). Formation of requirements for anti-mine energy-absorbing seats of armored combat vehicles. *Collection of Sciences. Proceedings of the Central Research Institute of Weapons and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine*, Kyiv. Iss. 2 (61), pp. 18–30.
4. Bisyk S.P., Davydovskiy L.S., Chepkov I.B., et al. (2016). Theoretical evaluation of mine resistance of multipurpose tactical vehicle Kozak2. *Weapons and military equipment*, no. 1(9), pp. 26–31. doi: [10.34169/2414-0651.2016.1\(9\).26-31](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2016.1(9).26-31)
5. Shahravi S., Rezvani M.J., Jahan A. (2019). Multi-response Optimization of Grooved Circular Tubes Filled with Polyurethane Foam as Energy Absorber. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, no. 12 (1), pp. 133–149.

6. Davydovs'kyi L.S., Bisyk S.P., Chepkov I.B. et al. (2020). Alternatives of Energy Absorption Element Design Parameters for an Armored Combat Vehicle Seat Under Explosive Loading. *Strength Mater.* <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00140-7>
7. Chepkov I. B., Lapitsky S. V., Kuchinskiy A. V., Kuchinska O. B., Zirka M. V., Zvershkhovskiy I. V., Hurnovich A. V., Dokuchaev O. V., Andriyenko A. M., Oliarnik B. O. (2024). Experimental Studies on the Effect of Destructive Reagents on Metal Structural Elements. *Powder metallurgy industry and managerial economics.* vol. 63, pp.117–122. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11106-024-00443-3>
8. Chepkov I. B. Rol ta mistse materialoznavstva u stvorenni novitnoho ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki Zbroinykh Syl Ukrainy. [The role and place of materials science in the creation of modern weapons and military equipment of the Armed Forces of Ukraine]. *Visnik Nacionalnoi akademii nauk Ukraini*, 2023, no. 6, pp. 73–83. DOI: 10.15407/visn2023.06.073
9. Chepkov I. B., Hurnovych A. V., Lapyts'kyi S. V., Oliarnyk B. O., Trofymenko V. H., Maistrenko O. A. Method of Conversion for the Ballistic Coefficient of Bullets. *Strength of Materials*, 2020, Volume 52, pp. 419–422. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00193-8>
10. Hrubel M. H., Krainyk L. V., Khomenko V. P. Doslidzhennia konstruktivnykh osoblyvostei ta taktyko-tekhnichnykh kharakterystyk boiovykh bronovanykh mashyn typu MRAP [Research into the design features and tactical and technical characteristics of MRAP armored combat vehicles]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika.* Kharkiv, 2018, no. 1 (53), pp. 7–19.
11. Maystrenko A. L., Kushch V. I., Pashchenko E. A., Kulich V. G., Neshpor O. V., Bisyk S. P.. (2020). Ceramic Armour for Armoured Vehicles Against Large-Calibre Bullets. *Problemy Mechatroniki: uzbrojenie, lotnictwo, inzynieria bezpieczenstwa.* Vol. 11, no. 1 (39). Strony 9-16. DOI: [10.5604/01.3001.0014.0279](https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.0279)
12. Slyvynskiy O. A., Bisyk S. P., Chepkov I. B., Vaskivskiy M. I., Chernozubenko O. V. Problemy vyhotovlennia zvarnykh bronekorpusiv vitchyznianykh boiovykh bronovanykh mashyn [Problems of manufacturing welded armored hulls of domestic armored combat vehicles]. *Ozbroiennia i viiskova tekhnika*, 2017, no.4, pp. 29–38. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=WqJr8gAAAAJ&scstart=20&pagesize=80&sortby=pubdate&citation_for_view=WqJr8gAAAAJ:hFO9nPyWt4C
13. Kryvenko O. P., Lizunov P. P., Vorona Yu. V., Kalashnikov O. B. Modeliuvannia termopruznykh vlastyvostei kompozytnoho materialu v zadakhakh stiikosti bahatosharovykh obolonok [Modeling thermoelastic properties of composite materials in stability problems of multilayer shells. Management of complex systems development]. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system.* Kyiv, 2023, no. 54, pp. 77–89. [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.54.77-89](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.54.77-89)
14. Bazhenov V. A., Kryvenko O. P. *Stiikist i kolyvannia pruznykh neodnorodnykh obolonok pry termosylovykh navantazhenniakh* [Stability and oscillations of elastic inhomogeneous shells under thermal force loads]. Kyiv: Karavela, 2020. 187 p.
15. Krivenko O. P., Lizunov P. P., Vorona Yu. V., Kalashnikov O. B. (2023). A Method for Analysis of Nonlinear Deformation, Buckling, and Vibrations of Thin Elastic Shells of an Inhomogeneous Structure. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles.* Kyiv: KNUBA. Issue 110, pp. 131–149.
16. Smirnova Y., Huriia I., Loboda P. (2021). Liquid phase fabrication technology of layered Ti/Al composite. U.P.B. *Scientific bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science.* Vol. 83, iss. 4, pp. 273–282. URL: https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rezb3b_447954.pdf
17. Smetankina N. V., Misiura S.Yu., Misiura Ye.Yu. Analiz deformuvannia sharuvatykh konstruktivni aerokosmichnoi tekhniki pry bahatofaktornomu navantazhenni [Analysis of deformation of layered aerospace structures under multifactor loading]. *Matematychni problemy tekhnichnoi mekhaniky – 2024 : materialy mizhnarodnoi naukovoii konferentsii*, 18-19, 22 kvitnia 2024 r. : tezy dopov. Dnipro, 2024, pp. 43–45. <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/32847>
18. Smetankina N., Ugrimov S., Kravchenko I., Ivchenko D. (2020). Simulating the process of a bird striking a rigid target. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019.* Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 711–721. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_71
19. Shupykov A. N., Buzko Ya. P., Smetankyna N. V., Uhrymov S. V. *Nestatsyonaurnye kolebaniya mnohosloinnykh plastyn y obolochek y ykh optymyziatsiya* [Unsteady vibrations of multilayer plates and shells and their optimization]. Kharkov. KhNĖU, 2004. 252p.
20. Keramichni broneplyty – tekhnolohichna evoliutsiia zakhystu [Ceramic armor plates – technological evolution of protection Ceramic armor plates – technological evolution of protection]. Elektronnyi resurs. <https://balistyka.ua/articles/keramichni-broneplyty-tekhnolohichna-evolyutsiya-zakhystu.01.07.2024>
21. Burlaienko V. M., Lvov H. I., Dimitrova–Burlaienko S. D. Doslidzhennia stiikosti metal-matrychnykh kompozytnykh balok zminnoho poperechnoho pererizu z aksialnohradientnym armuvanniam [Study of the stability of metal-matrix composite beams of variable cross-section with axial gradient reinforcement]. *Visnyk NTU «KhPI». Serii: Mashynoznavstvo ta SAPR*, 2025, no. 2, pp. 26–34. DOI:<https://doi.org/10.20998/2079-0775.2025.2.04>
22. Burlayenko V. N., Kouhia R., Dimitrova S. D. (2024). [Free vibration analysis of curvilinearly tapered axially functionally graded material beams.](https://doi.org/10.3390/app14156446) *Applied Sciences.* <https://doi.org/10.3390/app14156446>
23. Burlayenko V. N., Kouhia R., Dimitrova S. D. (2024). Free vibration analysis of curvilinearly tapered axially functionally graded material beams. *Applied Sciences*, vol. 14, no. 15, pp. 6446. <https://doi.org/10.3390/app14156446>
24. Altenbach H., Altenbach J., Kissing W. (2018). *Mechanics of Composite Structural Elements*, 2nd edn. Springer, Singapore
25. Tkachuk M., Tkachuk A. (2024). Large deformation of cable networks with fiber sliding as a second-order cone programming. *International Journal of Solids and*

- Structures*, vol. 298, pp. 112848. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2024.112848>
26. Kanno Y. *Nonsmooth Mechanics and Convex Optimization*. 9781420094244, CRC Press (2011). URL <https://books.google.se/books?id=52XMBQAAQBAJ>.
 25. Tkachuk M., Tkachuk A. Large deformation of cable networks with fiber sliding as a second-order cone programming. *International Journal of Solids and Structures*, 2024, Vol. 298, pp. 112848/ <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2024.112848>
 26. Kanno Y. *Nonsmooth Mechanics and Convex Optimization*. 9781420094244, CRC Press (2011). URL <https://books.google.se/books?id=52XMBQAAQBAJ>
 27. Tkachuk M. Pryntsyp minimumu dodatkovoi enerhii dlia kabelnykh merezh vidnosno vektornoї zminnoi syly [Complementary energy principle for cable networks in terms of force vector variable]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*. 2022, no. 1, pp. 85–90. doi: 10.20998/2079-0775.2022.1.09
 28. Tkachuk M., Linder C. (2012). The maximal advance path constraint for the homogenization of materials with random network microstructure. *Phil. Mag.* 92 (22). P. 2779–2808. DOI: [10.1080/14786435.2012.675090](https://doi.org/10.1080/14786435.2012.675090)
 29. Kanno Y., Ohsaki M. (2006). Contact analysis of cable networks by using second-order cone programming. *SIAM J. Sci. Comput.* vol. 27 (6), pp. 2032–2052. <https://doi.org/10.1137/S106482750343194>
 30. Negi V., Picu R. C. (2019). Mechanical behavior of cross-linked random fiber networks with inter-fiber adhesion. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. vol. 122, pp. 418–434. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.11.003>
 31. Tkachuk M. M. (2022). Elastic Homogenization of Materials with Composite Network Structures. Springer Nature link. Published: 10 June 2022 Volume 263, pages 104–119, DOI: [10.1007/s10958-022-05910-z](https://doi.org/10.1007/s10958-022-05910-z)
 32. Tkachuk M. M. (2019). Metod pruzhnoi homohenzatsii bimodalnykh merezh [Method of elastic homogenization of bimodal networks]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 7, pp. 107–115. <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2019.7.17>.

Надійшла (received) 29.04.2026

Стаття прийнята до друку 20.05.2026

Опублікована 29.05.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Грабовський Андрій Володимирович / Grabovskiy Andrey – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; тел.: +380502881027; e-mail: andrej8383@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>

Ткачук Ганна Володимирівна / Tkachuk Ganna – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник кафедри «Інформаційні технології та системи колісних і гусеничних машин ім. О. О. Морозова», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: TkachuckAV@tmm-sapr.org; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0435-1847>

Васильєв Антон Юрійович / Vasiliev Anton – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; тел.: +380675793843; e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8106-0950>

Ткачук Микола Анатолійович / Tkachuk Mykola A. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; доктор технічних наук, професор, професор кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: +380667146697; e-mail: tma@tmm-sapr.org; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>

Коба Андрій Миколайович / Koba Andrii – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; тел.: +380996203009; e-mail: a.skoba89@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0162-9208>

Набоков Анатолій Володимирович / Nabokov Anatoliy – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; e-mail: avnabokov@gmail.com

Цимбал Ганна Іванівна / Tsybal Hanna – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; провідний інженер кафедри інформаційних технологій та систем колісних і гусеничних машин імені О.О. Морозова, м. Харків, Україна; e-mail: tma@tmm-sapr.org

Карпов Вадим Олегович / Karпов Vadym – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, доктор філософії, старший викладач кафедри «Інформаційні технології і системи колісних та гусеничних машин імені О. О. Морозова; м. Харків, Україна; e-mail: tma@tmm-sapr.org; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7851-2458>

Рікунов Олег Миколайович / Rikunov Oleg – полковник, кандидат технічних наук, доцент, Національна академія Національної гвардії України, заступник начальника кафедри «Управління логістикою» ННІ ПКК; м. Харків, Україна; тел.: +380667146697; e-mail: rikunov317@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7581-7531>

Богач Андрій Станиславович / Bohach Andrii – кандидат технічних наук, командир самохідного артилерійського дивізіону військової частини А 4010, Україна; e-mail: bogach@tmm-sapr.org; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0359-3450>