

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Melnyk A. O. — PhD Student, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 4d Akademika Glushkova Avenue, Kyiv, Ukraine, 02000; anastasiia.melnyk@knu.ua; ORCID: 0000-0002-3167-4353

Rozora I. V. — D. Sc. in Physics and Mathematics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 4d Akademika Glushkova Avenue, Kyiv, Ukraine, 02000; +38 (044) 521-35-35; irozora@knu.ua; ORCID: 0000-0002-8733-7559

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Мельник Анастасія Олександрівна — аспірантка, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, просп. Академіка Глушкова 4д, м. Київ, Україна, 02000; anastasiia.melnyk@knu.ua; ORCID: 0000-0002-3167-4353

Розора Ірина Василівна — д-р фіз.-мат. наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, просп. Академіка Глушкова 4д, м. Київ, Україна, 02000; +38 (044) 521-35-35; irozora@knu.ua; ORCID: 0000-0002-8733-7559

Надійшла до редакції 18.08.2025



<http://doi.org/10.35668/2520-6524-2025-3-08>
УДК 001.18; 001.89; 002.513.5; 330.3

Т. К. КВАША, заввідділу

О. І. КОВАЛЕНКО, с. н. с.

ПІДХОДИ ДО ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМІВ І ПРОГНОЗНІ ТЕНДЕНЦІЇ У СФЕРІ БРОНЕМАТЕРІАЛІВ

Резюме. Воєнні конфлікти, що супроводжуються масовими кульовими, вогневими та уламковими пораненнями, а також стрімкий розвиток у галузі вибухових речовин, боеприпасів, стрілецької зброї зумовлюють зростання балістичної загрози внаслідок недостатнього ступеня захисту військового контингенту та цивільного населення. Виникає нагальна потреба у створенні нових видів висококоміцних матеріалів із розширеними функціональними властивостями, що забезпечать високий рівень бронестійкості елементів засобів індивідуального захисту, військової техніки, особливо під час війн.

Мета дослідження полягає у визначенні наукових трендів у сфері броне- та захисних матеріалів, що формують нові стандарти мобільності, надійності й адаптивності захисних рішень у реальних бойових умовах.

У статті викладено результати дослідження щодо глобальних наукових трендів в цій сфері на основі аналізу публікацій міжнародної бази Web of Science. Результати підкреслюють наростаючий інтерес до досліджень, що пов'язані з технологіями створення броньових і захисних матеріалів. Зокрема визначено тенденції наукових публікацій, продуктивні країни/регіони та джерела публікацій, основні теми досліджень. Дослідження охоплює систематизовану добірку актуальних напрямів досліджень щодо технологій бронезахисту та оцінку ключових наукових викликів, пов'язаних із розробленням майбутніх матеріалів.

Підсумовано, що перспективи розвитку бронезахисних матеріалів полягають у глибокій інтеграції багатосарових, гібридних матеріалів, які поєднують кераміку, полімери, метали та інтелектуальні рішення. Інтеграція оптичних і телекомунікаційних технологій у бронезахист підвищує загальну ефективність бойових систем, забезпечуючи надійний зв'язок, оперативний контроль і точне керування. Такий підхід забезпечує оптимальний баланс між захистом, вагою і гнучкістю.

Ключові слова: критичні технології, бронезахисні матеріали, тренди майбутнього, короткостроковий прогноз, термостійка кераміка, інтелектуальні матеріали, композити, високотехнологічні сплави, нанопокриття.

ВСТУП

Для України, яка перебуває в стані війни, вкрай актуальним є розроблення та виготовлення нових бронестійких і захисних матеріалів, а також окреслення напрямів наукових досліджень у цій сфері. Це особливо важливо в умовах, коли оборонна промисловість має швидко реагувати на виклики воєнного часу.

Упродовж останніх п'яти років у науковому середовищі спостерігається стійке зростання інтересу до досліджень, що пов'язані з технологіями створення броньових і захисних матеріалів. Це підтверджується як кількісним приростом публікацій, так і стрімким зростанням їхньої цитованості. Загальна кількість наукових праць, присвячених цій тематиці, зросла у 1,8 раза — з 455 у 2020 р. до 817 у 2024.

Визначення новітніх трендів досліджень щодо бронезахисних матеріалів для сфери озброєння і військової техніки створить передумови для подальшого розвитку висококонкурентних технологічних напрямів, а також дасть змогу модернізувати наявне озброєння і поліпшити його тактико-технічні характеристики. Результати також можуть бути використані як орієнтир для формування державного замовлення на відповідні наукові дослідження.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 серпня 2017 р. № 600-р затверджено перелік критичних технологій у сфері виробництва озброєння та військової техніки, а також план заходів для їх державної підтримки. Цей перелік є фундаментом для визначення пріоритетних напрямів розвитку оборонної промисловості.

Перелік критичних технологій охоплює технології створення матеріалів нового покоління та виробів із них, зокрема технології створення бронематеріалів і захисних матеріалів.

Усвідомлюючи важливе значення науки та інновацій для сфери оборони, виявлення перспективних напрямів досліджень і актуальних проблем допоможе розробити стратегічні підходи до розв'язання складних питань наукового забезпечення майбутнього розвитку сфери захисту військової техніки та особового складу.

Мета дослідження полягає у визначення актуальних наукових трендів у сфері бронезахисних матеріалів.

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ ПУБЛІКАЦІЙ

Наука про броньові матеріали охоплює діапазон броньових матеріалів від сталі та легких сплавів, скла та кераміки до волокон, текстилю та захисного одягу.

Броньована сталь є найбільш використовуваною групою броньових матеріалів, а також є матеріалом вибору для більшості наземних військових транспортних засобів. Дослідження стосуються високолегованої та низьколегованої надвисокоміцних сталей [1]. У групі металічних матеріалів і сплавів значну частку становлять технології та розробки щодо економно леггованих сталей, а також щодо металокерамічних та антикорозійних захисних покриттів, сплавів нового покоління з підвищеними експлуатаційними характеристиками, інтелектуальних систем керування технологічним процесом [2].

Високоміцні сплави на основі алюмінію, титану та магнію є конкурентоспроможним вибором для легкої броньованої техніки, серед яких титанові сплави залишаються найбільш привабливим варіантом для розробки броньованих легких сплавів, особливо для аплікацій [3].

Останніми роками у виробництві балістичних захисних матеріалів значну увагу привернуло використання легких функціональних композитів із натуральних волокон. Це пов'язано з їхніми чудовими механічними властивостями, економічною ефективністю та екологічною стійкістю. Балістичні панелі виготовляються з використанням декількох шарів різноманітних композитів, які разом демонструють чудові механічні та куленепробивні властивості. Ці властивості дають їм змогу витримувати сильні удари, що підвищує їхню здатність до різних застосувань в оборонних, військових та аерокосмічних компонентах [4]. Поєднання керамічно-волокнистої композитної пластини з поліетиленовою пластиною є ще одним способом отримання доволі високих куленепробивних характеристик виробів [5].

Найбільш балістично ефективні бронематеріали та системи мають пластинчасту, ламіновану або шарувату структуру.

Провідними дослідженнями є розроблення та експлуатація нових нано- та інтелектуальних матеріалів для військової сфери (наприклад, графен, 2D-матеріали); нанорозмірні маніпуляції з матеріалами; використання штучного інтелекту для пошуку нових матеріалів. Ці дослідницькі напрями мають на меті виявити або використати нові та унікальні фізичні властивості матеріалів (наприклад, надпровідність, стійкість до впливу зовнішніх чинників), а також дешевші, міцніші, легші, довговічніші чи матеріали з вищими експлуатаційними можливостями [2; 6].

Індивідуальний бронезилет є одним із найважливіших засобів захисту людини від різноманітних важких і смертельних травм. З 2019 р. у бюджеті США визначено пріоритет — зближення

досліджень матеріалів із біологічними науками для розроблення нових матеріалів. Високе поглинання енергії є ще одним із ключових факторів у розробленні матеріалів і структур для бронезилетів [7; 8; 9].

Енергетичні матеріали стали одним із головних напрямів досліджень у світі [2]. Пористий матеріал має високі характеристики поглинання енергії, низьку щільність і добру гнучкість, тому його широко застосовують у виробництві бронезилетів.

Використання біологічно-подібних пористих матеріалів і структур привертає дедалі більшу увагу в галузі захисту від ударів та/або високого поглинання енергії. Наприклад, М. Тілен та ін. [10] проаналізували біомеханіку піноподібної шкірки помело, що здатна розсіювати значну кількість кінетичної енергії й становить модель для розроблення нових матеріалів і структур, що захищають людей від травм, спричинених ударами. Також С. Сян та ін. [11] провели числові та експериментальні дослідження поглинання енергії біоінспірованими багатозаровими структурами з градієнтним наповнювачем із піни, які імітували характеристики людського скелета під час осьового здавлювання.

У дослідженнях китайських та англійських авторів [12; 13] розглянуто багатозарові та функціонально градієнтні композитні біологічно-подібні структури з пористими архітектурами і без них із точки зору балістичних характеристик.

Однак узагальнювальні дослідження щодо нових бронезилетів та захисних матеріалів упродовж останніх років відсутні.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Методологія дослідження базується на наукометричному аналізі (на основі бази даних Web of Science (WoS) і передбачає такі етапи:

1. Формування масиву ключових слів.
2. Аналіз публікацій на основі WoS.

2.1. Пошук публікацій за всіма ключовими словами окремо.

2.2. Аналіз динаміки публікаційної активності, цитованості публікацій за кожним ключовим словом/словосполученням.

2.3. Обчислення узагальненого індексу наукової пріоритетності (I_{np}) як середнє геометричне індексів публікаційної активності та цитованості за формулою:

$$I_{np} = \sqrt{I_{па}/100 \cdot I_{ц}/100} \cdot 100, \quad (1)$$

де $I_{па}$ — індекс публікаційної активності (п. 2.2), $I_{ц}$ — індекс цитованості публікацій (п. 2.2).

Такий індекс забезпечує об'єктивну картину наукової ефективності, відображаючи як інтенсивність публікаційної активності, так і рівень

академічного визнання. Він дає змогу виділити найперспективніші напрями, у яких поєднуються глибина досліджень, актуальність і високий науково-технологічний потенціал.

2.4. Розбивка піднапрямів за індексами наукової пріоритетності і формування чотирьох кластерів публікацій за кожним тематичним напрямом окремо: з найвищими, високими, середніми та невисокими/малими I_{np} .

2.5. Перший кластер — пріоритетні наукові напрями, другий — перспективні наукові напрями, третій — середньоперспективні.

3. Визначення пріоритетних наукових напрямів.

Наукометричний аналіз (2020–2024 рр.).

За період 2020–2024 рр. було зафіксовано 3179 публікацій щодо бронезилетів та захисних матеріалів, без урахування робіт біомедичного й екологічного спрямування, що не мають безпосереднього відношення до військових застосувань.

Приблизно 40 % досліджень перебувають у відкритому доступі, що забезпечує ширший науковий обмін і підвищує глобальну доступність до результатів. Така динаміка демонструє не лише зростання академічного інтересу, а й практичну значущість тематики захисту в умовах сучасних безпекових викликів.

Майже 80 % усіх публікацій припадають на п'ять галузей: матеріалознавство, прикладна фізика, фізична хімія, нанотехнології та мультидисциплінарні науки. Найбільша частка належить категорії “Матеріалознавство. Багато-профільний” — понад 1100 записів, що вказує на ключову роль саме цієї дисципліни в удосконаленні бронетехнологій. Помітною є також участь таких галузей, як металургія, оптика, електроніка та фізика конденсованого стану.

Географічний розподіл публікацій демонструє провідні позиції Китаю, США та Індії, які забезпечують майже 70 % усієї наукової продукції в цій сфері. Китай є беззаперечним лідером як за обсягами публікацій (понад 1500), так і за кількістю залучених наукових установ. Значну активність виявляють також Південна Корея, Україна, Польща, Велика Британія та Німеччина. Україна посідає шосте місце у світі, що підтверджує її наукову спроможність і стратегічну зацікавленість у розвитку захисних технологій, особливо в контексті посиленої потреби в безпекових рішеннях.

Серед наукових установ, що публікують найбільше статей у цій галузі, домінують китайські академічні та прикладні структури. До десятки лідерів входять чотири китайські заклади, два американські, а також представники з Індії, Єгипту, Південної Кореї та України. Участь

українських університетів і наукових установ у глобальному публікаційному процесі свідчить про поступову інтеграцію української науки в міжнародний науковий простір.

У видавничому аспекті публікації зосереджені переважно у п'яти провідних видавництвах, з-поміж яких Elsevier, MDPI, Wiley, Springer Nature та American Chemical Society. Найбільша кількість публікацій належить Elsevier, що зміцнює його статус головного гравця у сфері оборонної наукової публіцистики. Важливо, що серед видавців, які сприяють відкритому доступу, помітну роль відіграє MDPI — провідний канал оперативного наукового обміну.

Цитованість досліджень у цій сфері зростає надзвичайно стрімко. Якщо у 2020 р. було зафіксовано лише 352 посилання на публікації з тематики бронезахисту, то у 2024 р. їхня кількість сягнула понад 17 тисяч. Такий приріст (майже в 50 разів) є свідченням не лише зростання загального обсягу досліджень, а й високої релевантності та прикладної значущості результатів.

Відповідно до індексу наукової пріоритетності визначено ключові наукові напрями, які мають найбільший науковий потенціал, серед яких:

- термозахист і енергопоглинання;
- легкі конструкції та багатофункціональні композити;
- наноструктуровані армуючі елементи;
- графенові модифікації та вуглецеві нанотрубки;
- термостійка кераміка та інтелектуальні матеріали.

У коротко- та середньостроковій перспективі наукова активність буде зосереджена на розвитку механізмів поглинання енергії та створенні легких конструкцій, що дадуть змогу забезпечити високий рівень захисту без збільшення ваги техніки. Ключовими характеристиками нових матеріалів стане поєднання міцності, термостійкості та адаптивності, що критично важливо для мобільної бойової техніки. Це надасть можливість мінімізувати ушкодження від вибухових і кінетичних навантажень.

Дослідження будуть сфокусовані також на:

- композитах нового покоління, зокрема з використанням графену, вуглецевих нанотрубок, нанокераміки;
- високотехнологічних сплавах, стійких до корозії, термічного впливу та втоми матеріалу;
- багатофункціональних нанопокриттях, які поєднують захист із властивостями сенсорів, засобів протирадіолокаційного та протиелектромагнітного захисту.

Це дасть змогу створити матеріали з новими функціональними властивостями, які виходять за межі традиційного бронювання.

Значну увагу також привертають дослідження в галузі електромагнітного захисту, фотоелектричних сенсорів, нанопокриттів і електрохімічних властивостей матеріалів, що стають особливо важливими в умовах гібридних загроз і електронної війни. Дослідження також охоплюють питання модернізації систем захисту, зокрема присвячені розробленню:

- нових структур, які здатні селективно розподіляти та поглинати енергію удару;
- адаптивних шаруватих систем, що можуть змінювати свої властивості залежно від типу загрози;
- елементів активного захисту, які виявляють і нейтралізують загрозу до моменту контакту.

Ще одним важливим вектором є інтеграція бронетехнологій із цифровими системами, що охоплює:

- інтелектуальні матеріали, які змінюють жорсткість, прозорість або форму в режимі реального часу;
- інтеграцію сенсорів безпосередньо в структуру броні (виявлення пробоїн, перегріву, вібрацій);
- зв'язок броні з IT-системами управління боєм для оперативного реагування на пошкодження або загрози.

Окреслимо пріоритетні напрями з найвищим потенціалом.

Полімерні бронематеріали нового покоління: очікується подальше зростання складних багатокомпонентних полімерів із контрольованими властивостями. Завдяки хімічному інжинірингу з'являться матеріали, які будуть поєднувати жорсткість, гнучкість, термостійкість і здатність до енергопоглинання.

Механізми енергопоглинання та захисту від вибухів: попри відносно невисокий темп зростання в патентах, ці напрями отримують високі індекси наукового впливу. Це означає наявність глибокої дослідницької бази, яка в найближчому майбутньому може дати поштовх до технологічного прориву, особливо під час впровадження в практичні бойові системи.

Легкі бронетехнології з використанням кераміки та наноматеріалів: у поєднанні з вуглецевими структурами (графен, зменшений графен) це дасть змогу суттєво знизити вагу без втрати захисних характеристик. Наявність незначної кількості провідних гравців у цьому напрямі дає підстави очікувати активне входження нових розробників.

Захисний одяг та індивідуальні рішення: індивідуальний захист стає не лише елементом

особистої безпеки, а й частиною бойової ефективності. Розвиток адаптивного бойового одягу з вбудованими сенсорами, охолодженням, захистом від хімічної зброї є одним із найбільш реалістичних і швидко комерціалізованих сценаріїв.

Таким чином, загальна динаміка розвитку наукових досліджень у сфері захисних технологій свідчить про формування нового покоління бронематеріалів, здатних відповідати на складні виклики сучасного бою. Такі матеріали поєднують легкість, міцність, адаптивність, а також можливість інтеграції з інтелектуальними системами бойових платформ. Ідеться не лише про фізичний захист, а й про інформаційну автономність, вбудовану діагностику та взаємодію з іншими елементами оборонної інфраструктури.

Очікується, що в найближчі п'ять років саме ці напрями залишатимуться в центрі наукового дискурсу, формуючи основу для технологічного прориву у сфері захисту. Поєднання класичних матеріалознавчих підходів із сучасними досягненнями в галузях нанотехнологій, електроніки, сенсорики та оптики створює підґрунтя для появи нових рішень, що зорієнтовані на перевагу у високоінтенсивних бойових діях і глобальну адаптацію до гібридних загроз.

Цей підхід дає змогу перейти від пасивного захисту до динамічної, адаптивної оборонної архітектури, що поєднує матеріальну міцність з інформаційною перевагою.

Тренди в сучасних бронезахисних рішеннях

Однією з ключових тенденцій є багатошаровість, що стала базовим принципом формування бронезахисних систем. Сучасні рішення поєднують керамічні фронтальні шари, полімерні матриці та металеві армування, що дає змогу не лише ефективно протистояти різноманітним загрозам (кулі, уламки, вибухові хвилі), а й оптимізувати співвідношення ваги, міцності та гнучкості броні. Це критично важливо для збереження мобільності бойових одиниць і комфортності індивідуального захисту.

Хімічний інжиніринг активно використовують для поліпшення властивостей матеріалів. Завдяки застосуванню функціональних груп, ізомерів, замісників та інших хімічних структур створюються матеріали з передбачуваними і регульованими фізико-механічними характеристиками. Це надає можливість адаптувати броню під конкретні завдання, наприклад, підвищувати термостійкість чи ударну стійкість відповідно до умов бойового застосування.

Окремим напрямом виступає механічна оптимізація, що акцентує на підвищенні ударостійкості, пружності та здатності матеріалів поглинати енергію ударів. Сучасні розробки дедалі

більше базуються на інженерному моделюванні та експериментальних дослідженнях для пошуку оптимальних конфігурацій, що дають змогу підвищити захисні характеристики без надмірного збільшення ваги чи товщини.

Інтеграція оптичних, сенсорних і цифрових систем у броню перетворює її з пасивного захисту на "розумний" матеріал. Сучасні бронезахисні рішення можуть не лише зупиняти загрозу, а й передавати дані про пошкодження, температуру, хімічне зараження чи інші параметри, забезпечуючи оперативний моніторинг стану техніки чи бойового одягу.

Водночас мобільність та ергономіка є надзвичайно важливими чинниками, особливо для таких індивідуальних засобів захисту, як шоломи, бронезилети та бойовий одяг. Сучасні розробки зорієнтовані на максимальний захист за мінімальної ваги, щоб знизити фізичне навантаження на військових і зберегти їхню маневреність у бою.

Попри значний прогрес, у галузі залишаються важливі виклики. *Першим викликом* є масштабованість інновацій. Чимало провідних рішень перебувають на лабораторних або прототипних стадіях і потребують не лише технічного доведення, а й наявності відповідної промислової інфраструктури, сертифікації та стандартизації для впровадження в масове виробництво.

Другий виклик пов'язаний із комплексністю та інтероперабельністю. Нові матеріали та конструкції мають бути сумісні з чинними бойовими системами, відповідати умовам експлуатації в полі, підлягати ремонту, а також бути логістично підтриманими в польових умовах. Це потребує тісної співпраці між науковцями, виробниками та військовими.

Також складністю виступає інтеграція багатошарових матеріалів у наявні конструкції бронетехніки та індивідуального захисту без втрати їхніх технічних і експлуатаційних характеристик.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

Упродовж 2025–2030 рр. галузь бронезахисту демонструватиме перехід від класичних матеріалів до високофункціональних, адаптивних і цифрових систем, що інтегровані в загальну бойову інфраструктуру. Акцент зміщується з простого механічного захисту на створення матеріалів і систем, що поєднують захист, мобільність, зв'язок і швидке реагування на загрози.

Найбільш проривні рішення варто очікувати на перетині матеріалознавства, хімії, цифрових технологій та бойової ергономіки — саме ці синергії визначатимуть майбутнє захисних систем і здатність армій до адаптації у швидкоплинному середовищі сучасної війни.

Дослідницька активність свідчить про формування нової парадигми бронетехнологій, де класичні матеріали вдосконалюються за рахунок додавання нанокomпонентів, функціональних хімічних груп, електропровідності, а також здатності до самодіагностики.

Технологічні тренди найближчого майбутнього:

1) багатошаровість як основа ефективного захисту;

2) комбінація кераміки, полімерів, армувальних волокон і гнучких композитів вже зараз демонструє високий потенціал і стає стандартом у бронетехнологіях. Подальші дослідження в цьому напрямі передбачають ще тонші та легші шари, здатні адаптуватися до типу загрози. Зростає роль розумного шарування (з елементами сенсорики та термо-, електроізоляції);

3) інженерія хімічного складу матеріалів;

4) зростаючий вплив хімії на майбутнє бронезахисту. Завдяки цілеспрямованому конструюванню молекулярної структури матеріалів стає можливим налаштовувати їхні властивості під конкретні бойові завдання (наприклад, термостійкість або стійкість до вибуху);

5) механічна оптимізація броні;

6) розвиток технологій ударопоглинання, амортизації та розподілу навантаження відіграє вирішальну роль у створенні сучасних бронезилетів і панелей;

7) інтеграція сенсорики та інтелектуальних рішень у броню;

8) цифрове виробництво.

Пропонується здійснити патентний аналіз у цій сфері для визначення тих напрямів наукових досліджень, які вже впроваджуються в практику, а також тих, що не охоплені наукометричним аналізом, для виявлення напрямів, які вважалися секретними до початку виробництва і не представлені у публікаціях бази даних WoS.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dynamic constitutive behavior investigation of a novel low alloy ultra-high strength steel / T. Lu, Y. Li, H. Zhao, C. Wang, S. Han // *Materials research express*. — 2021. — Vol. 8. — Issue 1. DOI: 10.1088/2053-1591/abd5d1.
2. Кваша Т. К. Технологічні тренди у сфері нових матеріалів для енергетики та військової сфери / Т. К. Кваша, О. В. Коваленко // *Грааль науки: An integrated approach to science modernization: methods, models and multidisciplinary*: зб. матеріалів III Міжнар. наук.-практ. конф. (29 квіт. 2022 р.). — 2022. — № 12–13. — С. 154–163. — Access mode: <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/grail-of-science/issue/view/29.04.2022>.
3. *The Science of Armour Materials* / Ed. by I. G. Crouch. — Elsevier Ltd: A volume in Woodhead Publishing in Materials. — 2017. — 715 p.
4. Recent developments in natural fiber hybrid composites for ballistic applications: a comprehensive

review of mechanisms and failure criteria / D. Balaji, R. Lakshminarasimhan, A. Murugan et al. // *Facta universitatis*. — 2024. — Vol. 22. — No. 2. — P. 343–383. — Access mode: <https://casopisi.junis.ni.ac.rs/index.php/FUMechEng/article/view/12515/5354>.

5. *Chen J. M. Lightweight Design and Experimental Study of Ceramic Composite Armor* / J. M. Chen, Y. H. Zeng, S. W. Cui // *Processes*. — 2022. — No. 10 (6). — P. 1056. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10061056>.
6. Андрощук Г. О. Нанотехнології у XXI столітті: стратегічні пріоритети та ринкові підходи до впровадження [Електронний ресурс] : монографія / Г. О. Андрощук, А. В. Ямчук, Н. В. Березняк та ін. — Київ : УкрІНТЕІ, 2011. — 272 с. — Режим доступу: <http://www.uinpei.kiev.ua/sites/default/files/nanotechnologii.pdf>.
7. Energy absorption of bio-inspired multi-layered graded foam-filled structures under axial crushing / X. Xiang, S. Zou, N.S. Ha et al. // *Composites. Part B Engineering*. — 2020. — No. 198. (Supplement C). DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108216.
8. *Bates S. R. G. 3D printed polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption* / S. R. G. Bates, I. R. Farrow, R. S. Trask // *Mater. Des.* — 2016. — No. 112. — P. 172–183.
9. Laser additive manufacturing of bio-inspired lattice structure: forming quality, microstructure and energy absorption behavior / Y. Du, D. Gu, L. Xi et al. // *Materials Science and Engineering: A*. — 2020. — Vol. 773. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138857>.
10. Structure-function relationship of the foam-like pomelo peel (*Citrus maxima*)-an inspiration for the development of biomimetic damping materials with high energy dissipation / M. Thielen, C. N. Schmitt, S. Eckert et al. // *Bioinspir Biomim*. — 2013. — Vol. 8 (2). — P. 025001. DOI: 10.1088/1748-3182/8/2/025001.
11. Energy absorption of bio-inspired multi-layered graded foam-filled structures under axial crushing / X. Xiang, S. Zou, N.S. Ha et al. // *Compos. Part B: Eng.* — 2020. — Vol. — P. 198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108216>.
12. Low-velocity impact resistance behaviors of bio-inspired helicoidal composite laminates with non-linear rotation angle based layups / Hongyong Jiang, Yiru Ren, Zhihui Liu et al. // *Composite Structures*. — 2019. — Vol. 214. — P. 463–475. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.034>.
13. Damage tolerance of bio-inspired helicoidal composites under low velocity impact / D. Ginzburg, F. Pinto, O. Iervolino, M. Meo // *Composite Structures*. — 2017. — Vol. 161. — P. 187–203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.097>.

REFERENCES

1. Lu, T., Zhao, Y. Li, Zhao, H. J., Wang, C. X., & Han, S. (2021). Dynamic constitutive behavior investigation of a novel low alloy ultra-high strength steel. *Materials research express*, 8 (1). DOI 10.1088/2053-1591/abd5d1.
2. Kvascha T. K., & Kovalenko O. V. (2022). Tekhnologichni trendy u sferi novykh materialiv dlia enerhetyky ta viiskovoi sfery [Technological trends in the field of new materials for energy and military applications]. *Hraal nauky* [Grail of Science]: An integrated approach to science modernization: methods, models, and multidisciplinary: materials from the III International Scientific and Practical Conference

- (April 29, 2022), 12-13. P. 154-163. Retrieved from: <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/grail-of-science/issue/view/29.04.2022> [in Ukr.].
3. Crouch, Ian G. (Ed.) (2017). *The Science of Armour Materials*. Elsevier Ltd, 715 pp.
 4. Balaji, D., Lakshminarasimhan, R., Murugan, A., Rangappa, S. M., Siengchin, S., & Marinkovic, D. (2024). Recent developments in natural fiber hybrid composites for ballistic applications: a comprehensive review of mechanisms and failure criteria. *Facta universitatis*, 22 (2), 343-383. Retrieved from: <https://casopisi.junis.ni.ac.rs/index.php/FUMechEng/article/view/12515/5354>.
 5. Chen, J. M., Zeng, Y. H., & Cui, S. W. (2022). Lightweight Design and Experimental Study of Ceramic Composite Armor. *Processes*, 10 (6), 1056. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10061056>.
 6. Androshchuk, H. O., Yamchuk, A. V., Berezniak, N. V., Kvasha, T. K., Musina, L. A., & Novitska, H. V. (2011). Nanotehnologii u XXI stolitti: stratehichni prioriteti ta rynkovi pidkhody do vprovadzhennia [Nanotechnologies in the 21st century: strategic priorities and market approaches to implementation]. Kyiv, 272 p. Retrieved from: <http://www.uinte.kiev.ua/sites/default/files/nanotechnologii.pdf> [in Ukr.].
 7. Xiang, X., Zou, S., Ha, N. S., Lu, G., & Kong, I. (2020). Energy absorption of bio-inspired multi-layered graded foam-filled structures under axial crushing. *Composites. Part B Engineering*, 198. (Supplement C). DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108216.
 8. Bates, S. R. G., Farrow, I. R., & Trask, R. S. (2016). 3D printed polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption. *Mater. Des.*, 112, 172-183.
 9. Du, Y., Gu, D., Xi, L., Dai, D., Gao, T., Zhu, J., & Ma, C. (2020). Laser additive manufacturing of bio-inspired lattice structure: forming quality, microstructure and energy absorption behavior. *Mater. Sci. Eng. A.*, 773. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138857>.
 10. Thielen, M., Schmitt, C. N., Eckert, S., Speck, T., & Seidel, R. (2023). Structure-function relationship of the foam-like pomelo peel (*Citrus maxima*)-an inspiration for the development of biomimetic damping materials with high energy dissipation. *Bioinspir Biomim*, 8 (2): 025001. DOI: 10.1088/1748-3182/8/2/025001.
 11. Xiang, X., Zou, S., Ha, N.S., Lu, G., & Kong, I. (2020). Energy absorption of bio-inspired multi-layered graded foam-filled structures under axial crushing. *Compos. Part B: Eng.* 198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108216>.
 12. Jiang, H., Ren, Y., Liu, Z., Zhang, S., & Lin, Z. (2019). Low-velocity impact resistance behaviors of bio-inspired helicoidal composite laminates with non-linear rotation angle based layups. *Composite Structures*, 214, 463-475. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.034>.
 13. Ginzburg, D., Pinto, F., Iervolino, O., & Meo, M. (2017). Damage tolerance of bio-inspired helicoidal composites under low velocity impact. *Composite Structures*. 161, 187-203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.097>.

T. K. KVASHA, Head of the Department

O. I. KOVALENKO, PhD in Economics

APPROACHES TO IDENTIFYING PROMISING DIRECTIONS AND FORECASTING TRENDS IN THE FIELD OF ARMOR MATERIALS

Abstract. Military conflicts accompanied by massive bullet, fire, and shrapnel wounds, as well as rapid developments in the field of explosives, ammunition, and small arms, contribute to the growth of ballistic threats due to the insufficient level of protection of military personnel and civilians. Therefore, there is an urgent need to create new types of high-strength materials with new functional properties that will ensure a high level of armor resistance for elements of personal protective equipment and military equipment, especially during wars.

The goal is to identify scientific trends in the field of armor and protective materials that are shaping new standards of mobility, reliability, and adaptability of protective solutions in real combat conditions. Method: scientometric analysis

This article presents the results of a study on global scientific trends in this field based on an analysis of publications in the international Web of Science database. The results highlighted the growing interest in research related to technologies for creating armor and protective materials. In particular, trends in scientific publications, productive countries/regions and sources of publications, and main research topics were identified. The study includes a comprehensive collection of current research directions in armor protection technologies and an assessment of key scientific challenges related to the development of future materials.

It has been concluded that the prospects for the development of armor materials lie in the deep integration of multilayer, hybrid materials that combine ceramics, polymers, metals, and intelligent solutions. The integration of optical and telecommunications technologies into armor protection increases the overall effectiveness of combat systems by providing reliable communication, operational control, and precise guidance. This approach provides an optimal balance between protection, weight, and flexibility.

Keywords: critical technologies, armor protection materials, future trends, short-term forecast, heat-resistant ceramics, smart materials, composites, high-tech alloys, nanocoatings.

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Кваша Тетяна Костянтинівна — заввідділу, ДНУ “Український інститут науково-технічної експертизи та інформації”, вул. Антоновича, 180, м. Київ, Україна, 03150; +38 (066) 234-22-77; tkvasha13@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1371-3531; ResearcherID: R-4526-2017

Коваленко Олена Іванівна — канд. екон. наук, с. н. с., ДНУ “Український інститут науково-технічної експертизи та інформації”, вул. Антоновича, 180, м. Київ, Україна, 03150; +38 (050) 961-32-30; olena.kovalenko2024ua@gmail.com; ORCID: 0009-0000-4427-1564; ResearcherID: NXC-4360-2025

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kvasha T. K. — Head of the Department, State Research Institution “Ukrainian Institute of Scientific and Technical Expertise and Information”, 180, Antonovycha Str., Kyiv, Ukraine, 03680; +38 (066) 234-22-77; tkvasha13@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1371-3531; ReseacherID: R-4526-2017

Kovalenko O. I. — PhD in Economics, Senior Research Fellow, State Research Institution “Ukrainian Institute of Scientific and Technical Expertise and Information”, 180, Antonovycha Str., Kyiv, Ukraine, 03150; +38 (050) 961-32-30; olena.kovalenko2024ua@gmail.com; ORCID: 0009-0000-4427-1564; ResearcherID: NXC-4360-2025

Надійшла до редакції 21.08.2025



**ШАНОВНІ ПРЕДСТАВНИКИ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ТА НАУКОВИХ УСТАНОВ, НАУКОВЦІ, ВІНАХІДНИКИ!**

В УкрІНТЕІ впроваджено послугу “**Комплексне інформаційне обслуговування**”. Це актуальна і систематизована інформація з питань трансферу технологій, науково-технічного та інноваційного розвитку, що надсилається в онлайн-режимі і призначена для здійснення наукової та інноваційної діяльності. Видання надсилаються протягом року згідно з вказаною на сайті Інституту періодичністю. До вашої уваги інформаційний пакет “**Комплексний**” (8 видань):

- фаховий журнал “Наука, технології, інновації”;
- інформаційний бюлетень “Дослідження, технології та інновації у Європейському Союзі”;
- дайджест новин “Наука, технології, інновації”;
- дайджест трансферу технологій;
- “Збірник рефератів дисертацій, НДР та ДКР”;
- “Бюлетень реєстрації НДР та ДКР”;
- бюлетень “План проведення наукових, науково-технічних заходів в Україні”;
- “Закони та підзаконні акти, директивні документи у сфері вищої освіти, науки, науково-технічної інформації, науково-технологічного та інноваційного розвитку України”.

КОНТАКТИ:

телефон (044) 521-00-39,

e-mail: uintei.ua@gmail.com, uintei.info@gmail.com

Детальніше на сайті УкрІНТЕІ: **www.uintei.kiev.ua**