

*О. В. САВВОВА, О. Г. ТУР, О. В. БАБИЧ***РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ ЩОДО СТВОРЕННЯ ПОЛЕГШЕНИХ СКЛОКОМПОЗИТІВ ДЛЯ БРОНЕЗАХИСТУ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ**

Встановлено нагальну необхідність розробки та впровадження полегшених склокомпозитів для бронезахисту спеціальної техніки в умовах воєнних дій. Визначення сучасного стану та прогнозу розвитку ситуації, а також конкретних пропозицій щодо використання новітніх досягнень науки і техніки в даній області, стануть значущим внеском у формуванні науково-технічної політики в галузі створення нових матеріалів для бронезахисту. В роботі проаналізовано основні види тенденції ринку багатошарових елементів для скління та захисту техніки встановлено перспективність застосування наноструктурованих склокристалічних матеріалів як елементів скління та захисту легкоброньованої і авіаційної техніки. Сформульовано мету роботи, завдання та основну гіпотезу роботи, які визначають необхідність розробки методологічного підходу при розробці склокомпозитів для бронезахисту та оцінки їх конкурентоздатності. Забезпечення відновлення авіаційної та наземної спеціальної техніки може бути реалізовано шляхом розробки ефективного захисного шару на основі полегшених високоміцних наноструктурованих склокристалічних матеріалів. Обґрунтовано вибір склокристалічних матеріалів та конструкцій броньових композицій: для локального захисту легкоброньованої техніки, що передбачає створення дисперснокерамічної броні, для скління авіаційної техніки, що передбачає створення багатошарової склокомпозиції за технологією триплексування. Оцінка конкурентоздатності бронеелементів дозволяє встановити, що склокомпозити для бронезахисту відрізнятимуться від існуючих аналогів: значно меншою вагою та вартістю, більшою технологічністю, бронестійкістю, радіопрозорістю, регульованою світлопроникністю, високою живучістю, ремонтоздатністю. Визначено, що одержання та впровадження в практику склокомпозиційних матеріалів нового типу дозволить підвищити обороноздатність країни, забезпечити швидкий ремонт та надійну експлуатацію захисних елементів в умовах високошвидкісних термо-механічних навантажень та значно знизити імпортозалежність оборонного комплексу в умовах надзвичайних і кризових ситуацій: військових конфліктів та катастроф.

Ключові слова: склокомпозиційні матеріали; кераміка; міцність; прозорість; спеціальна авіаційна та легкоброньована техніка

*О. V. SAVVOVA, O. G. TUR, O. V. BABICH***DEVELOPMENT OF A METHODOLOGICAL APPROACH TO THE CREATION OF LIGHTWEIGHT GLASS COMPOSITES FOR ARMOR PROTECTION OF SPECIAL EQUIPMENT**

The urgent need for the development and implementation of lightweight glass composites for armor protection of special equipment in the conditions of military operations has been established. Determining the current state and forecast of the development of the situation, as well as specific proposals for the use of the latest achievements of science and technology in this area, will be a significant contribution to the formation of scientific and technical policy in the field of creating new materials for armor protection. The paper analyzes the main types of market trends in multilayer elements for glazing and protection of equipment, establishes the prospects for the use of nanostructured glass-crystalline materials as glazing and protection elements for lightly armored and aviation equipment. The purpose of the work, tasks and the main hypothesis of the work are formulated, which determine the need to develop a methodological approach in the development of glass composites for armor protection and assess their competitiveness. Ensuring the restoration of aviation and ground special equipment can be implemented by developing an effective protective layer based on lightweight high-strength nanostructured glass-crystalline materials. The choice of glass-crystal materials and designs of armor compositions is justified: for local protection of lightly armored vehicles, which involves the creation of dispersed ceramic armor, for glazing of aviation equipment, which involves the creation of a multilayer glass composition using triplexing technology. The assessment of the competitiveness of armor elements allows us to establish that glass composites for armor protection will differ from existing analogues: significantly lower weight and cost, greater manufacturability, armor resistance, radio transparency, adjustable light transmission, high survivability, repairability. It is determined that the production and implementation of new types of glass composite materials in practice will increase the country's defense capability, ensure rapid repair and reliable operation of protective elements under high-speed thermo-mechanical loads, and significantly reduce the import dependence of the defense complex in emergency and crisis situations: military conflicts and disasters.

Keywords: glass composite materials; ceramics; strength; transparency; special aviation and lightly armored vehicles

Вступ. Для України важливість актуальної проблеми створення нових захисних матеріалів значно зросла за останній час у зв'язку з необхідністю підвищення обороноздатності країни та внаслідок ведення бойових дій. Відповідно до Стратегії національної безпеки України, затвердженої Указом Президента України від 14 вересня 2020 року № 392/2020, а саме ст. 60 «Україна зміцнить бойовий потенціал Збройних Сил України, інших органів сил оборони шляхом...оснащення новими, зокрема високотехнологічними, зразками озброєння і військової техніки...» нагальною потребою є розробка та впровадження полегшених високоміцних склокомпозитів для відновлення та бронезахисту спеціальної техніки, особливо в умовах ведення бойових дій. Сучасний стан та прогноз розвитку ситуації, а також конкретні пропозиції щодо

використання новітніх досягнень науки і техніки в даній області, стануть значущим внеском у формуванні науково-технічної політики в галузі створення нових матеріалів для бронезахисту. Зниження ваги бронематеріалу, вдосконалення його захисних та експлуатаційних властивостей сприятиме скороченню безповоротних бойових втрат військовослужбовців і техніки та підвищення ефективності бойових можливостей підрозділів Збройних Сил України [1].

Аналіз сучасних конструкційних матеріалів для виробництва колісної броньованої техніки (КБТ) та технічних вимог до них на підставі проведення чисельних випробувань різних типів броньованих автомобілів дозволив встановити, що для каркасів бронемашин використовуються звичайні конструкційні сталі, а для броньованої обшивки –

спеціальні бронесталі з високими характеристиками міцності ($\sigma_B = 1600\text{--}2000$ МПа, $\sigma_T = 1250\text{--}1450$ МПа) і твердості (500–650 HBV) [2]. Також для бронювання КБТ рекомендовано застосовувати нові мартенситні сталі з додаванням нікелю і титану, які характеризуються надвисокою міцністю – сталь 300 і інші (США). Однак додаткове бронювання значно знижую мобільність техніки внаслідок доданої ваги.

Перспективним напрямком для броньованого захисту військової КБТ вважається сучасний модульний бронезахист з використанням новітніх композитних матеріалів. Для забезпечення живучості та боєздатності екіпажу машини сучасні пасивні системи захисту поєднують різні елементи, наприклад, сталеву броню, керамічні композитні системи, вкладиші та інші сучасні матеріали. Використання комбінацій різних матеріалів забезпечує суттєве зменшення додаткової ваги КБТ (до 15–25 %), що забезпечить підвищення мобільності бронеавтомобілів [2]. Однак використання вітчизняної броньованої сталі для авіаційної техніки обмежується високою питомою вагою та складністю одночасного забезпечення їх необхідної твердості та ударної в'язкості [3].

На даний час в Україні відомі бронееlementи (БЕ) вітчизняного та закордонного виробництва, які характеризуються високими експлуатаційними властивостями. Для відновлення та захисту спеціального обладнання легкоброньованої техніки (ЛБТ) застосовуються вітчизняні керамічні та композиційні бронееlementи, які мають значну вагу або вартість, придатні до ремонту лише у стаціонарних умовах, що суттєво обмежує їх застосування для авіаційної техніки.

Широке застосування корунду та композиційних матеріалів на основі кераміка/сталь [4], кераміка/полімер [5] обмежується їх високою питомою вагою та низькою ударною в'язкістю, а вітчизняних керамічних композитів, зокрема на основі $B_4C\text{--}NbB_2\text{--}SiC$ – високою вартістю та складністю технологічного процесу виробництва [6]. Аналогічні обмеження характерні і для прозорих БЕ на основі монокристалів (сапфір) та керамічних матеріалів (оксинітрид алюмінію, шпінель), які забезпечують високий рівень бронестійкості елементів скління авіаційної техніки [7, 8], але мають низькі показники в'язкості руйнування [9].

Широко застосовувані багатошарові стекла вказаного призначення характеризуються значною вагою, недостатніми захисними властивостями та схильністю до розшарування [10]. Це обумовлює важливість рішення наявної проблеми шляхом створення композиційного БЕ на основі високоміцних полегшених та менш вартісних склокристалічних матеріалів, в тому числі з високою світлопроникністю.

Широке застосування композиційних БЕ на основі склокристалічних матеріалів (СКМ) (магній- та літійалюмосилікатні системи) обмежується високими температурами одержання [11], вартістю

сировини, складністю технологічного режиму та низькими показниками в'язкості руйнування [12]. Відмінністю СКМ на основі дисилікату літію є одночасне поєднання високої механічної міцності для забезпечення стійкості до дії енергорушуючих складових та здатності поглинати і розсіювати ударні навантаження. Однак, більшість розробок відносяться до прозорих або напівпрозорих силікатів, які мають невисокі механічні властивості [12].

Поряд з цим важливим фактором забезпечення комплексного захисту техніки та підвищення живучості БЕ в умовах дії сучасних засобів ураження є розробка їх оптимального складу та конструкції. Існуючі конструкції БЕ передбачають відновлення захисту лише при довготривалому технічному обслуговуванні [6, 11]. Тому актуальною задачею підвищення надійності захисту авіаційної техніки у тому числі при її склінні, є розробка композиційних БЕ на основі полегшених СКМ з високими експлуатаційними властивостями та регульованою світлопроникністю.

Мета роботи. Метою даної роботи є розробка комплексного методологічного підходу щодо створення полегшених склокомпозитів для бронезахисту спеціальної легкоброньованої та авіаційної техніки.

Для досягнення означеної мети були поставлені наступні завдання:

- обґрунтування розробки захисних бронематеріалів та її економічна доцільність;
- розробка основної ідеї та робочої гіпотези;
- вибір напрямків дослідження та обґрунтування вибору складів скломатеріалів;
- вибір способів модифікації матеріалів;
- вибір конструкцій бронееlementів для захисту спеціальної легкоброньованої та авіаційної техніки;
- оцінка конкурентоздатності.

Результати роботи та їх обговорення. За даними комплексного маркетингового дослідження у 2021 році світовий ринок листового скла оцінювався в 273,43 мільярда доларів США, і очікується, що з 2022 по 2030 рік він зростатиме на 4,3% у середньому на рік. Для багатошарових захисних стекел ринок зростатиме з річними темпами до 6,1 % з 2021 до 2032 року і відповідно складатиме від 19,3 до 34,4 мільярда доларів США. В той же час, за даними маркетингового дослідження світовий ринок броньованого скла оцінювався в 3 мільярди доларів США вже в 2018 році. З 2021 до 2031 року буде спостерігатися його подальше зростання (рис.1).

Однак, в Україні виробництво флоат-скла припинено у зв'язку з повномасштабним вторгненням. Натомість відчувається значна потреба у захисних багатошарових стеклах, яка визначається наказом МОН України від 04.10.2023 № 1202 «Про внесення змін до наказу № 1104 від 07.09.2023 р. за п. 38 «Технології відновлення (ремонт) авіаційної техніки державної авіації: їх вузлів, агрегатів, деталей, комплектуючих». Для забезпечення потреби

обороздатності України у 2025 році витрати на озброєння та військову техніку зростуть до рекордних 739 млрд грн. Вітчизняні підприємства оборонно-промислового комплексу мають намір наростити свої виробничі потужності до 30 млрд доларів. Тому розробка нових вітчизняних матеріалів з високою ударною міцністю і їх наступне впровадження у галузі транспортного машинобудування забезпечить надійний захист та здатність до швидкого відновлення авіації та

спеціальної техніки, ушкоджених внаслідок дії високошвидкісних динамічних навантажень.

Основною ідеєю є створення полегшених високоміцних бронееlementів для на ступних задач: відновлення – скління прозорих склокомпозитів за технологією триплексування; для захисту корпусу техніки – використання дисперснокерамічної рухомої або нерухомої композиційної броні на основі поліфункціонального ситалу.

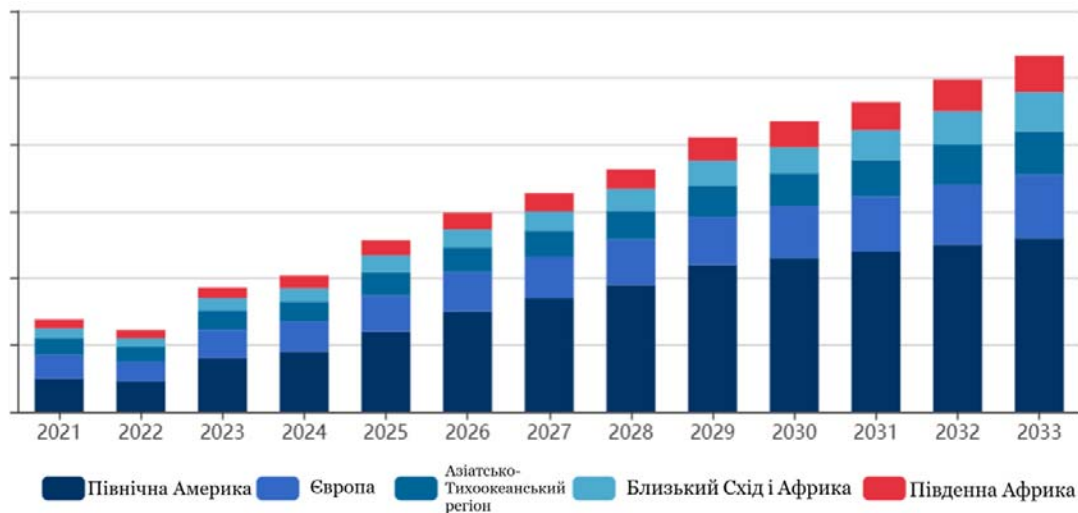


Рисунок 1 – Ринок броньованого скла (%) за регіонами (2021–2033) [13]

Високоміцні склокомпозити для бронезахисту авіаційної та наземної спеціальної техніки на основі ударостійких наноструктурованих склокристалічних матеріалів з нанодисперсною структурою за механізмом фазового розподілення, яким властиві високі міцнісні показники та експлуатуються в умовах високошвидкісних динамічних навантажень, характеризуються зниженою вартістю і вагою, підвищеною технологічністю при порівнянні з широко застосовуваними бронематеріалами такими як метали [3], у тому числі ударною в'язкістю порівняно з керамікою та композитами на їх основі (корунд, карбід кремнію, карбід бору, шпінель, сапфір, оксинітрид алюмінію [4–9]), багатошаровими стеклами [10] та склокристалічними матеріалами [9, 1, 12].

Відомі склокристалічні матеріали з найвищим показником тріщиностійкості $1,3\text{--}3,5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ передбачають високу температуру варки вихідних стекол для одержання склокристалічних матеріалів та процесу кристалізації, який реалізується в умовах тривалої термічної обробки [12].

Нові наноструктуровані склокристалічні матеріали для одержання бронееlementів передбачають двостадійну термічну обробку впродовж лише $0,5\text{--}1,0$ годин та забезпечення $K_{IC} \approx 8,0\text{--}12,0 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, ударну в'язкість 6 кДж/м^2 ; змінний модуль пружності об'ємних та поверхневих шарів від 100 до 400 ГПа, одночасно регульовану

світлопроникність

(0–75 %) для скління та захисту [14, 15].

Броньова композиція для локального захисту передбачає створення дисперсно-склокерамічної броні (ДКБ):

1. руйнуючий шар є системою з склокомпозиційних елементів, зв'язаних між собою полімером, енергопоглинаючий шар виконаний з арамідної тканини та металу (пористий алюміній);

2. руйнуючий шар є системою склокомпозиційних елементів у вигляді тіл обертання, які розміщено у вільному просторі фізеляжу й здатні до переміщення при порушенні цілісності конструкції.

Переваги ДКБ: висока живучість; низький «крайовий» ефект; знижена вартість; простота та надійність технології виготовлення; висока ремонтпридатність, що дозволяє проводити швидко та просте усунення бойових пошкоджень (рис. 2).

Розміщення склокерамічного сердечнику у порядку набору бджолиних комірок дозволить ефективно поглинати енергію удару завдяки наноструктуруванню стекол та руйнувати ударник завдяки багаторазовому відхиленню енергії звукової хвилі та матеріалу ударника [16].

Бронееlementи на основі наноструктурованих склокристалічних матеріалів відповідають вимогам ВСТ 01.055.001 – 2021 (01) для застосування як пасивного захисту легкоброньованої техніки.

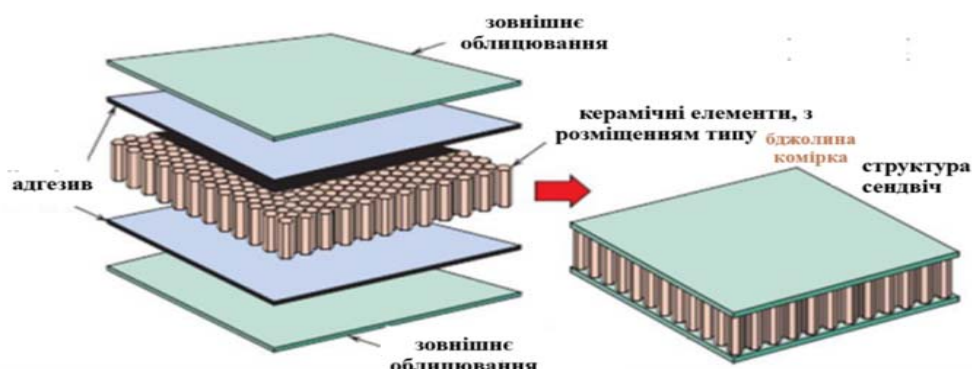


Рисунок 2 – Дисперсно-склокерамічний бронееlement

Броньова композиція для скління передбачає створення багатошарової склакомпозиції за технологією триплексування: енергоруйнуючий шар – прозорий ситал з захисними гідрофобними та електропровідними плівками / енергопоглинаючий шар – полімер. Збільшення стійкості виробу до розшарування при впливі температури та вологи досягається завдяки заповненню міжшляного простору полімерною плівкою.

Для забезпечення класу стійкості СК-4 (ДСТУ 4546:2008, EN 1063:1999) передбачена конструкція спеціального шаруватого типу, яка дозволить вдвічі знизити вагу бронепластины при порівнянні зі склом товщиною $167,4 \pm 0,5$ мм (рис. 3).

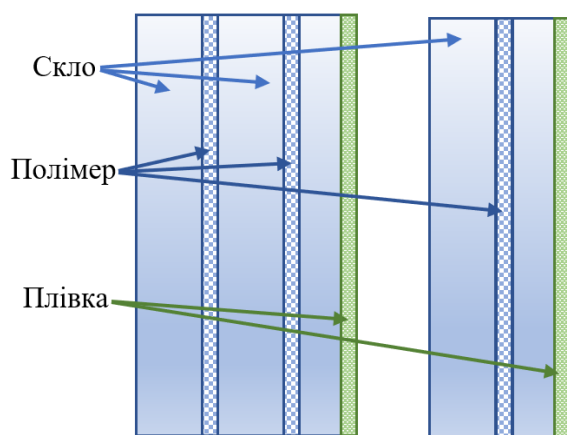


Рисунок 3 – Схема конструкції бронезахисного багатошарового склакомпозиційного матеріалу

Загальною тенденцією є збільшення частки кінцевої продукції з високою доданою вартістю, яка здійснюється шляхом модифікації поверхні склокристаличних матеріалів, механічної обробки та термодинамічними процесами з цільовими спеціальними властивостями, включаючи широкий спектр функціональних покриттів [17].

Оцінка конкурентоздатності бронееlementів дозволяє встановити, що склакомпозиції для

бронезахисту відрізнятимуться від існуючих аналогів:

- значно меншою вагою та вартістю за рахунок застосування у конструкції полегшених склокристаличних матеріалів, які відрізняються зниженням вмістом вартісних компонентів;
- більшою технологічністю за рахунок зниження температури та тривалості синтезу й оптимізації технологічного процесу та використання екологічно безпечної вітчизняної сировини;
- бронестійкістю, радіопрозорістю, регульованою світлопроникністю на рівні світових аналогів за рахунок забезпечення досконалості наноструктури дроблячого шару;
- високою живучістю за рахунок здатності дроблячого склокристаличного шару блокувати та заліковувати тріщини, руйнувати сердечник та розсіювати енергію удару;
- ремонтоздатністю завдяки застосуванню самовідновлюваної рухомої дисперснокерамічної броні та швидкою заміною дроблячого склокристаличного шару.

Реалізація вказаного методологічного підходу одержання та впровадження в практику склакомпозиційних матеріалів нового типу дозволить підвищити обороноздатність країни, забезпечити швидкий ремонт та надійну експлуатацію захисних елементів в умовах високошвидкісних термо-механічних навантажень та значно знизити імпортозалежність оборонного комплексу в умовах надзвичайних і кризових ситуацій: військових конфліктів та катастроф

Висновки. Розроблено комплексний методологічний підхід щодо розробки полегшених склакомполімерів для бронезахисту спеціальної легкоброньованої та авіаційної техніки, який полягає у теоретичному обґрунтуванні вибору складів бронееlementів їх конструкцій та оцінці їх конкурентоздатності з урахуванням відповідності міжнародним стандартам.

Визначено соціальний та економічний ефект від впровадження розроблених склакомполімерів БЕ, який полягає у вирішенні потреби неважливих полегшених БЕ та можливості їх безперебійного

постачання для надійного захисту техніки і персоналу від високошвидкісних механічних уражень та швидкого відновлення броньованої техніки в умовах ведення бою. Практичний ефект від використання результатів дозволить суттєво підвищити конкурентоспроможність вітчизняних виробів за рахунок зниження їх вартості та знизить імпортозалежність у галузі оборонних технологій, авіабудування за рахунок їх високих техніко-економічних характеристик.

Застосування полегшених склокомпозиційних бронееlementів для скління та захисту техніки шляхом створення вітчизняних конструкцій на основі наноструктурованих склокристалічних матеріалів, які відрізнятимуться від існуючих значно меншою вартістю, кращою технологічністю, живучістю, ремонтпридатністю та значенням бронестійкості на рівні світових аналогів полегшених склокомпозиційних бронееlementів сприятиме комплексному вирішенню проблеми безпеки особового складу та зменшенню втрат при виконанні бойових задач.

Список літератури

1. Подригало М. А., Баулін Д. С., Горелишев С. А., Манжура С. А., Ільченко М. І., Одейчук М. П., Іванець Г. В., Віштак І. В. Аналіз додаткового бронезахисту легкоброньованої техніки збройних сил України та іноземних держав. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2021. №2 (14). С. 89–96. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-89-96>
2. Чуприна В., Феденько В., Акимов О., Сорочкін О. Аналіз міцносних характеристик сучасних та перспективних конструкційних матеріалів для колісної броньованої техніки. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2024. 21 (3). С. 146–151. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.21.2024.18>
3. Кононенко Г.А., Кімстач Т.В., Сафронова О.А., Подольський Р.В. Взаємозв'язок між механічними властивостями броньової сталі та її балістичною стійкістю. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2023. № 1 (100). С. 22–31. <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.280323.22.941>
4. Sanusi O.M., Oyelaran O.A., Badmus J.A. Ballistic study of alumina ceramic-steel composite for structural applications. *J. Cer.Proc. Res.* 2020. № 21 (4). P. 501–507. <https://doi.org/10.36410/jcpr.2020.21.4.501>
5. Wu H.L., Miao C., Mu X.M., Cui X.Z., Yang Z.Z., Lu R. J., Dang W., Bai L.H., Wu X. Study on ballistic performance of a spherical cylindrical ceramic armor structure. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2023. Vol. 2478. 072010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2478/7/072010>
6. Мазур В.І., Богомол Ю.І., Упатов М.І. Спрямована кристалізація та 3d структура трифазної чотириккомпонентної евтектики в системі В4С-NbB2-SiC. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2021. № 1. С. 6–13. <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2021-2-1>
7. Zhuohao X., Shijin Yu, Yueming L. Materials development and potential applications of transparent ceramics: A review. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2020. Vol. 139. P. 13031–13040. <https://doi.org/10.1016/j.msre.2019.100518>
8. Ming W., Jiang Z., Luo G. Progress in Transparent Nano-Ceramics and Their Potential Applications. *Nanomaterials*. 2022. № 12. 1491. <https://doi.org/10.3390/nano12091491>
9. Gallo L.S., Villas Boas M.O.C. Transparent glass-ceramics for ballistic protection: materials and challenges. *J. Mat. Res. and Tech.* 2019. Vol. 8 (3). P. 3357–3372. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.05.006>
10. Heriana, Hadi B. K., Widagdo D., Kusni M. Experimental study on the behavior of glass/epoxy composite plate due to blast loading. *IOP Conf. Series: Mat. Sc. and Eng.* 2019. Vol. 508, 012060. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/508/1/012060>
11. Sant'Ana Gallo L., Célarié F., Bettini J., Candida M. A., Rodrigues D., Rouxel T., Zanotto E. D. Fracture toughness and hardness of transparent MgO-Al2O3-SiO2 glass-ceramics. *Cer. Int.* 2022. № 48 (7). P. 9906–9917. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.12.195ff>
12. Zhao T., Lian M.-M., Qin Y., Zhu J.-F., Kong X.-G., Yang J.-F. Improved performances of lithium disilicate glass-ceramics by seed induced crystallization. *J. Adv. Cer.* 2021. № 10 (3). P. 614–626. <https://doi.org/10.1007/s40145-021-0463-4>
13. *Звіт про ринок куленепробивного скла 2025 (глобальне видання)*. URL: <https://www.cognitivemarketresearch.com/bulletproof-glass-market-report?srsId> (дата звернення: 10.02.2025).
14. Savvova O., Voronov H., Fesenko O., Babich O., Pylypenko, O., Tsegelnyk Y. Nanostructured Heat-Resistant Glass-Ceramic Coatings for Corrosion Protection of Aircraft Engine Components Made From Heat-Resistant Alloys. *In book: Sustainability, Safety, and Applications of Nanomaterials-Based Corrosion Inhibitors. Chapter 6*. Publisher: IGI Global. 2024. P. 112–150. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-7640-9.ch006>
15. Savvova O., Tur O., Babich O., Smyrnyova Yu., Tymoshchuk I. Study of structure formation of transparent spinel-containing glass-ceramic materials for laser techniques. *Functional Materials*. 2024. №31 (2). P. 163–172. <https://doi.org/10.15407/fm31.02.163>
16. Selim M.S., El-Safty S.A., Shenashen M.A., Elmarakbi A. Advances in polymer/inorganic nanocomposite fabrics for lightweight and high-strength armor and ballistic-proof materials. *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 493. 152422. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152422>
17. Korba P., Pila J., Cibereová J., Sabo J. Construction and Safety Aspects of Glass Used in Aviation Transport. *Naše more*. 2015. №62 (3). P. 219–223. <https://doi.org/10.17818/NM/2015/S124>

References (transliterated)

1. Podryhalo M. A., Baulin D. S., Horielyshev S. A., Manzhura S. A., Ilchenko M. I., Odeichuk M. P., Ivanets H. V., Vishtak I. V. Analiz dodatkovoho bronezakhystu lehkobronovanoi tekhniky zbroinykh syl ukrainy ta inozemnykh derzhav. [Analysis of additional armor protection of light -armed forces of the Armed Forces of Ukraine and foreign countries]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*. [Bulletin of mechanical engineering and transport]. 2021, №2 (14), pp. 89–96. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-89-96>
2. Chupryna V., Fedenko V., Akymov O., Sorochkin O. Analiz mitsnosnykh kharakterystyk suchasnykh ta perspektyvnykh konstruktivnykh materialiv dlia kolisnoi bronovanoi tekhniky. [Analysis of strong characteristics of modern and prospective structural materials for wheeled armored equipment]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho*

naukovo-doslidnoho instytutu viprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki. [Collection of scientific works of the State Research Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment]. 2024, 21 (3), pp. 146–151.

<https://doi.org/10.37701/dndivsovt.21.2024.18>

3. Kononenko H.A., Kimstach T.V., Safronova O.A., Podolskyi R.V. Vzaïmozv'iazok mizh mekhanichnymy vlastyvoistamy bronovoi stali ta yïi balistychnoiu stiikistiï. [The relationship between the mechanical properties of armor steel and its ballistic resistance]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*. [Metal science and heat treatment of metals]. 2023, № 1 (100), pp. 22–31. 2023.

<https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.280323.22.941>

4. Sanusi O.M., Oyelaran O.A., Badmus J.A. Ballistic study of alumina ceramic-steel composite for structural applications. *J. Cer.Proc. Res.* 2020, № 21 (4), pp. 501–507.

<https://doi.org/10.36410/jcpr.2020.21.4.501>

5. Wu H.L., Miao C., Mu X.M., Cui X.Z., Yang Z.Z., Lu R. J., Dang W., Bai L.H., Wu X. Study on ballistic performance of a spherical cylindrical ceramic armor structure. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2023, Vol. 2478, 072010.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2478/7/072010>

6. Mazur V.I., Bohomol Yu.I., Upatov M.I. Spriamovana krystalizatsiia ta 3d struktura tryfaznoi chotyrykomponentnoi evtektiky v systemi B4C-NbB2-SiC. [Crystallization and 3D structure of the three-phase four-component eutectic in B4C-NBB2-SiC system]. *Novi materialy i tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni*. [New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering]. 2021, № 1. C. 6–13.

<https://doi.org/10.15588/1607-6885-2021-2-1>

7. Zhuohao X., Shijin Yu., Yueming L. Materials development and potential applications of transparent ceramics: A review. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2020, Vol. 139, pp. 13031–13040.

<https://doi.org/10.1016/j.mser.2019.100518>

8. Ming W., Jiang Z., Luo G. Progress in Transparent Nano-Ceramics and Their Potential Applications. *Nanomaterials*. 2022, № 12, 1491.

<https://doi.org/10.3390/nano12091491>

9. Gallo L.S., Villas Boas M.O.C. Transparent glass-ceramics for ballistic protection: materials and challenges. *J. Mat. Res. and Tech.* 2019, Vol. 8, (3), pp. 3357–3372.

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.05.006>

10. Heriana, Hadi B. K., Widagdo D., Kusni M. Experimental study on the behavior of glass/epoxy composite plate due to blast loading. *IOP Conf. Series: Mat. Sc. and Eng.* 2019, Vol. 508, 012060. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/508/1/012060>

11. Sant'Ana Gallo L., Célarié F., Bettini J., Candida M. A., Rodrigues D., Rouxel T., Zanotto E. D. Fracture toughness and hardness of transparent MgO-Al₂O₃-SiO₂ glass-ceramics. *Cer. Int.* 2022, № 48 (7), pp. 9906–9917.

<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.12.195ff>

12. Zhao T., Lian M.-M., Qin Y., Zhu J.-F., Kong X.-G., Yang J.-F. Improved performances of lithium disilicate glass-ceramics by seed induced crystallization. *J. Adv. Cer.* 2021, № 10 (3), pp. 614–626. <https://doi.org/10.1007/s40145-021-0463-4>

13. Zvit pro rynek kuleneprobnyvnoho skla 2025 (hlobalne vydannia). [Report on the Bullet -Productive Glass Market 2025 (Global Edition)]. Available at: <https://www.cognitivemarketresearch.com/bulletproof-glass-market-report?srltid> (accessed 10.02.2025).

14. Savvova O., Voronov H., Fesenko O., Babich O., Pylypenko O., Tsegelnyk Y. Nanostructured Heat-Resistant Glass-Ceramic Coatings for Corrosion Protection of Aircraft Engine Components Made From Heat-Resistant Alloys. In book: *Sustainability, Safety, and Applications of Nanomaterials-Based Corrosion Inhibitors. Chapter 6*. Publisher: IGI Global. 2024, pp. 112–150.

<https://doi.org/10.4018/979-8-3693-7640-9.ch006>

15. Savvova O., Tur O., Babich O., Smyrnova Yu., Tymoshchuk I. Study of structure formation of transparent spinel-containing glass-ceramic materials for laser techniques. *Functional Materials*. 2024, №31 (2), pp. 163–172.

<https://doi.org/10.15407/fm31.02.163>

16. Selim M.S., El-Safy S.A., Shenashen M.A., Elmarakbi A. Advances in polymer/inorganic nanocomposite fabrics for lightweight and high-strength armor and ballistic-proof materials. *Chemical Engineering Journal*. 2024, Vol. 493, 152422. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152422>

17. Korba P., Pila J., Cibereová J., Sabo J. Construction and Safety Aspects of Glass Used in Aviation Transport. *Naše more*. 2015, №62 (3), pp. 219–223.

<https://doi.org/10.17818/NM/2015/SI24>

Відомості про авторів / About the Authors

Саввова Оксана Вікторівна (Savvova Oksana) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6664-2274>, e-mail: savvova_oksana@ukr.net

Тур Олег Георгійович (Tur Oleh) – аспірант кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3438-0820>, e-mail: oleh.tur@kname.edu.ua

Бабіч Олена Вікторівна (Babich Olena) – кандидат технічних наук, старший дослідник, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0821-1585>, e-mail: lenysjababich@gmail.com