

С. О. РЯБІНІН, А. В. ЗАХАРОВ, М. С. МАЙСТАТ, С. Л. ЛІГЕЗІН

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ СКЛОКОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ СУЧАСНИХ БРОНЕЖИЛЕТІВ

У роботі проведено матеріалознавчий аналіз та експериментальне дослідження керамокомпозитного бронеелемента для індивідуального захисту. Метою було визначити оптимальну комбінацію керамічних і композитних шарів, що забезпечує ефективне руйнування снарядів, поглинання кінетичної енергії й мінімізацію маси. Запропоновано багат шарову архітектуру «жорстка керамічна поверхня — склокомпозиційний проміжний шар — полімерна підкладка», яка забезпечує послідовне розсіяння енергії й локалізацію руйнувань. Особливу увагу приділено розробці сподуменових склокристалічних матеріалів, модифікованих Y_2O_3 -стабілізованим ZrO_2 . Введення стабілізованого ZrO_2 стимулює формування тонкодисперсної β -сподуменової фази (до 85 об.%), що підвищує тріщиностійкість ($K_{IC} \approx 8,1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$) і модуль пружності ($E \approx 320 \text{ ГПа}$) при зниженій щільності ($\sim 2410 \text{ кг/м}^3$) порівняно з SiC . Досліджено термограми, мікроструктуру, фазовий склад і механічні властивості; отримані дані свідчать про підвищену вогнестійкість і здатність матеріалу виконувати функції руйнівного та демпферного шарів. Економічна оцінка показала кращий баланс «ціна – якість» у сподуменових склокомпозитів порівняно з карбідами, що знижує вартість бронееlementів при збереженні експлуатаційних характеристик. Набір рекомендацій охоплює технологічні маршрути, контроль адгезії та результати початкових випробувань, що підтверджують життєздатність рішень. Результати підтверджують перспективність застосування розроблених матеріалів у багат шарових бронееlementах класів 4–6 за ДСТУ 8782:2018. Запропоновані матеріали придатні для індивідуального захисту та бойової техніки; їх впровадження може знизити експлуатаційні витрати.

Ключові слова: елементи бронезахисту; склокомпозиційні матеріали; β -сподумен; наноструктура; зміцнені матеріали; вогнестійкість; градієнтна структура

S. O. RIABININ, A. V. ZAKHAROV, M. S. MAISTAT, S. L. LIHEZIN

INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR THE DEVELOPMENT OF GLASS-COMPOSITE MATERIALS FOR MODERN BODY ARMORS

The paper presents a materials-science analysis and experimental study of a ceramic-composite armor element for personal protection. The aim was to determine the optimal combination of ceramic and composite layers that ensures effective projectile break-up, kinetic energy absorption, and mass minimization. A multilayer architecture of “rigid ceramic front face — glass-composite intermediate layer — polymer backing” is proposed to provide sequential energy dissipation and localization of damage. Special attention was paid to the development of spodumene-based glass-ceramic materials modified with Y_2O_3 -stabilized ZrO_2 . Addition of stabilized ZrO_2 promotes formation of a fine-grained β -spodumene phase (up to 85 vol.%), which increases fracture toughness ($K_{IC} \approx 8.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$) and elastic modulus ($E \approx 320 \text{ GPa}$) while reducing density ($\sim 2410 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) compared to SiC . Thermograms, microstructure, phase composition and mechanical properties were investigated; the data indicate enhanced fire resistance and the ability of the material to function as both a sacrificial (fracturing) and damping layer. Economic assessment shows a superior cost-performance ratio of spodumene glass-composites versus carbides, reducing armor element cost while maintaining operational properties. Recommendations cover manufacturing routes, interlayer adhesion control and initial test results confirming feasibility. The results support the prospective application of the developed materials in multilayer armor elements of protection classes 4–6 according to DSTU 8782:2018. The proposed materials are suitable for personal protection and military vehicles and may reduce operational costs.

Keywords: armor protection elements; glass-composite materials; β -spodumene; nanostructure; strengthened materials; fire resistance; gradient structure

Вступ. На ранніх етапах броня виготовлялася зі сталі, яка ефективно поглинала енергію удару, але через велику вагу почали шукати легші матеріали, зокрема вдосконалені сталі, сплави заліза, алюмінію і титану. Згодом для зниження ваги броні (табл. 1) почали використовувати кераміку, яка має меншу густину, вищу твердість і міцність на стиск. Подальшим кроком стало використання композитів на полімерних матрицях (FRP), де керамічні шари, розміщені між полімерними композитами, поглинають залишкову енергію від снарядів завдяки своїй низькій густині. На сьогодні керамокомпозитна броня є найлегшою серед комерційно доступних альтернатив металевій броні.

Існують також «м'які» типи броні, що використовують лише FRP-композити або тканини без кераміки для захисту від легших загроз, наприклад куль з пістолетів, хоча для серйозніших загроз, таких як гвинтовочні кулі, або уламки, оптимальною є саме керамокомпозитна броня. Подальше обговорення зосереджено на цьому виді

броні з використанням полімерних матриць (PMC) або FRP.

Таблиця 1. Площинна густина різних типів броні [1]

Тип броні	Площинна густина (кг/м ²)
Сталь	283
Алюміній	267
Титан	220
Кераміка-алюміній	195
Керамокомпозит	98

Багат шарова керамокомпозитна броня зазвичай складається з трьох основних шарів: зовнішнього композитного FRP, що приймає перший удар, керамічного шару, що поглинає більшу частину енергії, та внутрішнього FRP, який утримує кераміку і додатково поглинає енергію. Для великих чи складних конструкцій керамічний шар часто складається з менших плиток, щоб підвищити

надійність кераміки, не даючи розтріскуватися всій панелі.

Керамокомпозитна броня (рис. 1) для великих структур може бути зовнішньою або інтегрованою. Інтегрована броня замінює основну металеву структуру, виконуючи подвійну роль – поглинання енергії та структурної основи, що робить її легшою та ефективнішою. Такі матеріали для останнього шару повинні відповідати як захисним, так і структурним критеріям.

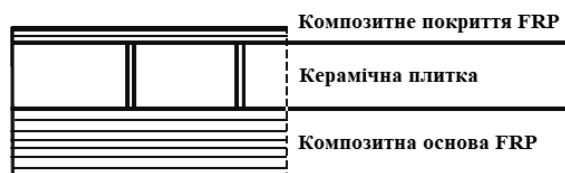


Рисунок 1 – Поперечний переріз керамокомпозитної броні

Інтегровану броню можна зробити багатофункціональною, додавши шари для захисту від електромагнітного випромінювання або від відкритого вогню. Для покращення сумісності між жорсткою керамікою та гнучкими FRP-композитами часто додають гумовий шар або металеві піни.

Шари броні можуть бути виготовлені окремо і з'єднані адгезивами або пресуватися разом під високою температурою. Великі структури з інтегрованою бронею можуть виготовлятися методом вакуумного формування смоли (VARTM) або інфузії смоли (RFI) [2, 3]. Інші методи [4] також підходять для структур із вбудованою керамікою.

Забезпечення міцного з'єднання між керамікою та FRP-композитами є складним завданням через низьку міцність зв'язку, що знижує стійкість до навантажень. Для посилення використовуються спеціальні адгезиви або додаткове обгортання плиток тканиною.

Мета роботи. Огляд сучасних рішень бронювання та порівняння з отриманими результатами.

Виклад основного матеріалу. Два основних матеріали, які складають керамокомпозитну броню, – це кераміка та композити. У цьому розділі коротко обговорюється вплив вибору цих матеріалів на вагу броні, товщину та продуктивність.

Комерційно доступні наступні види кераміки, що широко використовуються як елементи бронювання: оксид алюмінію (Al_2O_3), нітрид алюмінію (AlN), карбід бору (B_4C), карбід кремнію (SiC), діборид титану (TiB_2) та карбід вольфраму (WC).

Види кераміки можуть бути класифіковані на основі густини, для цього їх порівнюють з RHA еталоном. Види кераміки, що мають густину, більшу ніж RHA, називаються керамікою високої густини (WC). Якщо густина менша за RHA, таку кераміку називають керамікою низької густини (Al_2O_3 , AlN, B_4C , SiC).

Типова конфігурація зразка для тесту глибини проникнення, що використовується для оцінки та порівняння кераміки, схематично ілюструється на рис. 2.

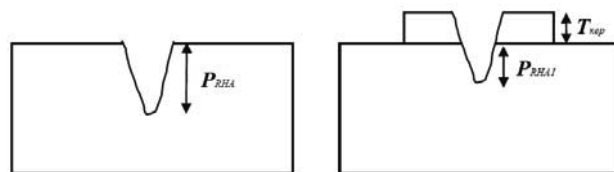


Рисунок 2 – Зразок для тестування на глибину проникнення для порівняння керамічних матеріалів.

Глибина проникнення у керамічно-металевій цілі порівнюється з ціллю з катано-гомогенною бронею (RHA). Використовуються різниця в глибині проникнення та зменшення ваги завдяки заміні металу на кераміку. Використовуючи експериментальні дані, обчислюється об'ємний приріст V_n через кераміку, використовуючи

$$V_n = \frac{P_{RHA} - P_{RHA1}}{T_{кер}}$$

Використовуючи це рівняння, можна отримати зменшення глибини проникнення завдяки наявності кераміки. Якщо керамічний шар має таку ж ефективність, як катано-гомогенна броня, тоді

$$P_{RHA} = P_{RHA1} + T_{кер}$$

Об'ємний приріст V_n дорівнює 1. Обернене значення V_n буде відносною товщиною $t_{відн}$ кераміки, нормалізованою з RHA:

$$t_{відн} = \frac{1}{V_n}$$

Масовий приріст M_n завдяки наявності кераміки замість RHA можна визначити з приросту об'єму, використовуючи формулу:

$$M_n = V_n \frac{\rho_{RHA}}{\rho_{кер}}$$

де ρ_{RHA} та $\rho_{кер}$ – це густини RHA та керамічного шару. Відповідно, відносно зменшення маси $\rho_{відн}$ через наявність кераміки можна оцінити, використовуючи

$$\rho_{відн} = \frac{1}{M_n}$$

Збільшення маси та збільшення об'єму різних видів кераміки були порівняні в роботах [5, 6]. Отримані в цих дослідженнях результати викладені в таблицях 2 та 3.

Таблиця 2. Порівняння характеристик різних керамік на основі DOP [5]

Кераміка	Густина, кг/м ³	V_n	$t_{відн}$	M_n	$\rho_{відн}$
RHA	7810	1	1	1	1
Al ₂ O ₃	3680	1,01	0,99	2,14	0,47
B ₄ C	2500	1	1	3,13	0,32
SiC	3200	1,25	0,8	3,05	0,33
TiB ₂	4400	1,67	0,6	2,96	0,34

Таблиця 3 – Порівняння характеристик різних керамік на основі DOP [6]

Кераміка	Густина, кг/м ³	V_n	$t_{відн}$	M_n	$\rho_{відн}$
RHA	7810	1	1	1	1
Al ₂ O ₃ – спечений 95%	3680	0,7	1,43	1,67	0,6
Al ₂ O ₃ – спечений 98%	3780	0,78	1,29	1,67	0,6
Новий Al ₂ O ₃ – спечений	3690	0,88	1,14	2	0,5
AlN – гарячепресований	3270	1	1	2,5	0,4
B ₄ C – гарячепресований	2520	0,78	1,29	2,5	0,4
SiC – гарячепресований	3230	1	1	2,5	0,4
Реакційно-зв'язаний SiC	3210	0,88	1,14	3,33	0,3
TiB ₂ – гарячепресований	4520	1,75	0,57	3,33	0,3

Тому, якщо найкраща продуктивність броні потрібна при мінімальній товщині та найнижчій вазі, TiB₂ є оптимальним матеріалом. Однак, TiB₂ відомий як дорогий матеріал. Якщо вартість є вирішальним фактором, то B₄C та SiC є рівноцінними альтернативами, але вимагають більшої товщини. Орієнтовне порівняння вартості кераміки подано в таблиці 4, використовуючи дані з [6].

Таблиця 4. Відносна вартість кераміки [6]

Кераміка	Густина, кг/м ³	Відносна вартість
RHA	7810	0,01
Al ₂ O ₃ – спечений 95%	3680	0,02
Al ₂ O ₃ – спечений 98%	3780	0,03
Новий Al ₂ O ₃ – спечений	3690	0,05
AlN – гарячепресований	3270	0,35
B ₄ C – гарячепресований	2520	0,7
SiC – гарячепресований	3230	0,35
Реакційно-зв'язаний SiC	3210	0,08
TiB ₂ – гарячепресований	4520	1

Вартість усіх видів кераміки вказана відносно вартості найдорожчої кераміки TiB₂. TiB₂ у 100 разів дорожчий за RHA. SiC становить 70% від вартості TiB₂. Оксид алюмінію є найекономічнішою керамікою. AlN та B₄C займають проміжне положення. FRP композити складаються з двох

Максимальне зменшення маси до 70 % порівняно з RHA було зафіксовано за використання SiC. Автори проводили дослідження з використанням довгих кінетичних енергійних снарядів, маса яких становила 105 г, а швидкість коливалася в межах 1550...1800 м/с. В іншому дослідженні використовували бронебійні диски з стабілізаторами на основі 30 та 40 мм.

Зменшення маси за використання B₄C та TiB₂ також має схожий порядок. Однак, найменша товщина для досягнення аналогічної продуктивності має TiB₂. Всі інші види кераміки мають товщину, яка майже така ж або більше, ніж у катано-гомогенної броні.

основних компонентів – армуючого та матричного. Армування для броні виготовляється з довгих або безперервних волокон. Волокна використовуються виробниками броні у вигляді тканини. Різні шари тканини складаються разом, щоб досягти бажаної товщини броні, скріпленої матрицею. Матриця може бути нанесена зовні на суху тканину або ж тканина може бути попередньо просочена матрицею. Таким чином, вибір композитного матеріалу для броні включає три підвибори – волокна, архітектура тканини та матриця.

Високоефективні волокна, які використовуються для броні, можна класифікувати на чотири категорії [7]:

1. Класичні: скло, вуглець
2. Жорсткий ароматичний ланцюг: нейлон 6, нейлон 66, номекс, пара-арамідні волокна (кевлар, тварон, технора)
3. Термообробні: рідкокристалічні волокна, вектран; поліетилен з високим модулем (HMPE), спектра, дайнема, текмілон
4. Високотемпературні: полібензімідазол (PBI), поліфенілбензобісазол (PBO) – зилон

Скляні волокна є одними з найпопулярніших і найекономічніших високоефективних волокон. Відомо три типи скляних волокон – Е-скло, R-скло та S-скло. Вуглецеві волокна є наступними за популярністю високоефективними волокнами. Їх рідко використовують у елементах броні через їх крихкість. Типи вуглецевих волокон базуються на

вихідному матеріалі – на основі поліакрилонітрилу (PAN) та на основі смоли. Графітні волокна також є

вищою формою вуглецевих волокон. Властивості деяких з волокон наведені в таблиці 5.

Таблиця 5 – Властивості волокон [4, 8]

Волокно	Щільність (кг/м³)	Модуль (ГПа)	Межа витривалості (МПа)	Подовження (%)
Eglass	2540	72	3448	4
Carbon T300	1760	231	3750	1.4
Nylon-66	1140	5	1006	18.2
Kevlar-29	1440	67	2794	3.5
Kevlar-129	1440	96	3429	3.3
Kevlar-KM2	1440	64	3429	4.3
Spectra-900	970	79	2610	3.6
Spectra-1000	970	113	3250	2.9
Spectra-2000	970	124	3510	2.9
Zylon-AS	1540	180	5800	3.5
Zylon-HM	1560	270	5800	2.5

Волокна Spectra є найлегшими та мають помірну жорсткість і високу міцність. Найважчими волокнами є Eglass, але вони мають низьку жорсткість, високу міцність та найвищу подовженість. Вони також є економічно вигідними. Волокна Kevlar мають помірну вагу, але низьку жорсткість і високу міцність. Вуглець має помірну густину, високу жорсткість і високу міцність, але вуглецеві волокна є найбільш крихкими через їхню найнижчу подовженість. Волокна Zylon мають помірну густину, але високу жорсткість і дуже високу міцність. Однак ці волокна PBI/PBO відомі своєю значною вартістю.

Серед усіх цих волокон найбільш широко використовуються скло, арамід та HMPE. Скло популярне завдяки своїй низькій вартості, тоді як арамід та HMPE популярні через свою меншу вагу та кращу продуктивність. HMPE є найкращим із усіх, тому часто віддається перевага, коли важлива низька вага. Типові площі щільності плит Spectra Shield™ для рівнів загрози відповідно до Національного інституту юстиції (NIJ), США [9], наведені в таблиці 6 на основі [10, 11].

Таблиця 6 – Площа щільності плит Spectra для різних загроз [10, 11]

Загроза NIJ	Куля	Площа щільності (кг/м²) [10]	Площа щільності (кг/м²) [11]
IIA	9 mm FMJ RN, .40 S&W FMJ	2	3–4
II	9 mm FMJ RN, .357 Magnum JSP	4	4–5
IIIA	.357 SIJ FMJ RN, .44 Magnum SJHP	5	5–7
III	7.62 mm NATO FMJ	19	17–32
IV	.30 caliber M2 AP	32–41	32–37

З підвищенням рівня загрози вага броні зростає з 2 до 41 кг/м². Це дослідження повідомляє, що плити Spectra на 30% легші за керамічно-композитну броню до рівня NIJ 3 [9]. Для рівня NIJ 4 і вище потрібні

керамічні лицеві плити. Тому площа щільності для рівня загрози 4, показана в таблиці 7, залежить від керамічної лицеві плити.

Таблиця 7. Вплив типу плетіння на баллістичний ліміт

Шари	Плетіння	Товщина	Баллістичний ліміт (м/с) [12]	Баллістичний ліміт з корекцією товщини	Покращення
7	Звичайний	2.8	61	61	1
7	Сатин	3.5	86	69	1.13
17	Звичайний	5.7	102	102	1
17	Сатин	8	171	121	1.19
37	Звичайний	13.8	232	232	1
37	Сатин	14.3	262	252	1.09

Тканини можна класифікувати на ткани та неткани. Неткані тканини тримаються разом завдяки

волокнистій структурі та/або з'єднанню. Ткани тканини виготовляються шляхом переплетення ниток.

В залежності від архітектури, тканини можна поділити на двовірні (2D) та тривірні (3D). В залежності від типу переплетення, тканини можна розділити на односторонні (UD), прості, сатинові та сатинові плетення.

Плетення "кошик" схоже на просте плетення, але група з двох ниток переплітається замість однієї нитки. Твілеве плетення схоже на плетення "кошик", але лише одна нитка переплітається над парою з двох ниток. У твілі 2 на 2 одна нитка переплітається під двома нитками. Відповідно, у твілі 4 на 4 переплітається чотири нитки. Плетення "кошик" та твілеве плетення більш драпіруються у складних формах та запобігають вигину волокон.

Сатинове плетення можна класифікувати залежно від кількості підйомників [8]. Наприклад, у сатиновому плетенні з 4 підйомниками нитка переплітається з кожною четвертою ниткою. Аналогічно, можуть бути сатинові плетення з 5 або 8 підйомниками.

Переплетення найвищі в простому плетенні, нижчі в твілевому плетенні та найнижчі в сатиновому плетенні. Через переплетення волокна піддаються зминанню, тому їхня ефективність зменшується. Внаслідок цього механічні властивості та баллістична продуктивність погіршуються. Найбільше зминання спостерігається в тканинах простого плетення. Тканини з тоншими нитками (менша кількість волокон на нитку), але щільно переплетені (більше ниток на одиницю площі) показали кращі результати [8].

Типи плетення впливають на баллістичну продуктивність. У одному з таких досліджень [12] сатинові плетені ламінати показали на 9–19% кращу продуктивність у порівнянні з простим плетенням. Результати наведені в таблиці 7. Баллістичний ліміт з

корекцією товщини був отриманий за умови його лінійної зміни з товщиною.

У 3D тканинах також присутнє посилення в товщину. 3D тканини можуть бути виготовлені шляхом плетіння або переплетення. Посилення поза площиною покращує витривалість до пошкоджень у напрямку перпендикулярному до поверхні. Однак це погіршує характеристики в площині. В деяких дослідженнях було виявлено, що в 3D тканинах спостерігається значно більш локалізоване пошкодження порівняно з 2D. Проте також було зафіксовано зниження ефективності в поглинанні кінетичної енергії снаряда [19].

Користь 3D ткацтва для баллістичного ліміту була вивчена [13]. Продуктивність 2D звичайного ткацтва Eglass-епоксидної смоли була порівняна з зразками 3D ткацтва Eglass-епоксидної смоли такої ж товщини. Баллістичний ліміт 3D-тканих композитів становив 260,4 м/с, а 2D-композитів – 244,2 м/с.

У 2D ламінатах було досягнуто об'ємної частки волокна 50%. У той час як у 3D лише 45% вдалося досягти. Через 3D плетіння спостерігалось зниження модуля Юнга в напрямку волокна з 16 до 12 ГПа. Але модуль поза площиною збільшився з 8 до 11 ГПа. Таким чином, з 3D т weaving покращується баллістичний ліміт і властивості поза площиною, але властивості в площині погіршуються.

Ще один спосіб введення зміцнення через товщину – це прокладка стека шарів 2D тканини. Таке зшивання також може бути виконано, щоб утримати тканини разом під час виробництва. Вплив зшивання на баллістичні характеристики був кількісно оцінений і повідомлений у [12]. Результати представлені в таблиці 8. Вони показують, що зшивання знижує баллістичний ліміт і, таким чином, погіршує продуктивність. Дані представлені в таблиці 9.

Таблиця 8. Вплив прошивання в товщину на баллістичний ліміт

Тип прошивки	Шари	Тканина	Баллістичний ліміт (м/с) [12]
Без прошивки	7	Звичайний	61
Прошита з сіткою 12.7 мм			61
Прошита з сіткою 25.4 мм			50
Без прошивки	17		102
Прошита з сіткою 12.7 мм			97
Прошита з сіткою 25.4 мм			88
Без прошивки	7	Сатин	86
Прошита з сіткою 12.7 мм			66
Прошита з сіткою 25.4 мм			43
Без прошивки	17		171
Прошита з сіткою 12.7 мм			113
Прошита з сіткою 25.4 мм			94

Полімери є найбільш широко використовуваними матеріалами матриці. Полімери можна класифікувати на термореактивні та термопластичні [4, 8, 10]. Термореактивні полімери не можуть бути розплавлені при підвищенні

температури, але зазвичай є міцними та довговічними. Популярні термореактивні полімери – це епоксидні смоли, поліестери, фенолоформальдегідні смоли та вінілестери. Часто змішують два або більше компонентів. Ці компоненти

з'єднуються між собою при кімнатній температурі або під тиском при високій температурі. Більшість термореактивних полімерів не витримують температури вище 150 °C.

Таблиця 9. Вплив 3D плетіння на продуктивність Eglass-епоксидної смоли [13]

Властивість	2D просте плетіння	3D плетене
Товщина ламінату (мм)	12	12
Об'ємна частка волокна	0.5	0.45
Щільність (кг/м ³)	1850	1700
Модуль Юнга в площині (ГПа)	16	12
Модуль Юнга поза площиною (ГПа)	8	11
Сила зсуву (МПа)	120	142
Динамічна швидкість вивільнення енергії GIIcd (Дж/м ³)	1000	2000
Баллістичний ліміт швидкості (м/с)	244.2	260.4

Термопластичні матеріали м'якшають і плавляться з підвищенням температури, а потім знову твердіють при її зниженні. Вони є більш універсальними, оскільки їх можна розплавити та відремонтувати. Популярні термопластики – це полііміди (PI), полісульфон (PS), поліефірефіркетон

(PEEK), поліетилен (PE) та поліфеніленсульфід (PPS). Термопластики вимагають високих температур для обробки та витримують температури в діапазоні до 300 °C. Властивості деяких популярних матеріалів матриці наведені в таблиці 10, де T_g означає температуру склування.

Таблиця 10. Властивості деяких популярних матричних матеріалів [4, 14]

Полімер	Щільність (кг/м ³)	Модуль (ГПа)	Міцність на розрив (МПа)	Подовження (%)	T_g (°C)
Епоксидна смола – низький модуль	1163	2.2	55	8.1	177
Епоксидна смола – проміжний модуль, низька міцність	1273	3.4	48	1.4	216
Епоксидна смола – проміжний модуль, висока міцність	1218	3.4	103	2	216
Епоксидна смола – високий модуль	1246	5.2	138	2	216
Поліамід (PI)	1218	3.4	103	2	371
PEEK	1310	1.1	70.3–103	30–150	143
LDPE	925	0.172–0.282	8.3–31.4	100–650	–110
HDPE	959	1.08	22.1–31	10–1200	–90
UHMWPE	940	0.69	38.6–48.3	320–525	–

Існує кілька досліджень, які порівнюють продуктивність різних композитів. В одному з таких досліджень [15] продуктивність ламінатів зі скла-епоксидної смоли була порівняна з продуктивністю ламінатів з вуглецевих волокон-епоксидної смоли однакової товщини. Швидкість баллістичного ліміту (V50) ламінатів з вуглецевих волокон була на 17% нижча, ніж у ламінатів зі скла-епоксидної смоли. Через крихку природу вуглецевих волокон вони зазвичай показують гірші результати в порівнянні зі склом при впливі.

У іншому дослідженні [11] порівнюється площа маси, необхідна для захисту від двох загроз, використовуючи два різні композитні матеріали – арамід- фенолік та Spectra (табл. 11). Для обох загроз Spectra приблизно на 40% легший за арамід.

Ще один висновок можна зробити з даних, представлених у таблиці 11. Можна відзначити, що площа маси сталі зростає із збільшенням рівня загрози. Однак площа маси м'якої броні зростає набагато більше, ніж у сталі. У той час як площа маси сталі збільшується в 1,4 рази, площа маси м'якої

броні зростає в 3,7 рази. Таким чином, після певного рівня загрози переваги в вазі тканин зменшуються. Для нижчих загроз м'яка броня є значно легшою – 20% від ваги сталі. Але для вищих загроз вага тканини становить близько 50% від ваги сталі. Отже, перевага в вазі зменшується з однієї п'ятої до половини. У міру подальшого збільшення загрози тканини вже не є привабливими. Необхідні кераміка, і, отже, комбінації кераміка-композит є найлегшими рішеннями для високих загроз.

Таблиця 11. Площа маси різних м'яких броньованих матеріалів (кг/м²) [11]

Броньований матеріал	Площа маси 9 мм FMJ	Площа маси АК-47
Сталь	24.4	34.9
Ткана арамід/ фенолеформальдегід	7.9	29.4
Spectra Shield™	4.8	18.4

Вибір кераміки та FRP-композитів є основним аспектом проектування броні. У попередніх розділах продуктивність окремих матеріалів була представлена окремо. У цьому розділі представлена відносна продуктивність комбінацій. В одному з таких досліджень [16] порівнюється продуктивність кількох комбінацій броні. Для дослідження використовувалася куля $7.62 \times 54R$ Dragunov LPS. Повідомлені результати наведені в таблиці 12.

Таблиця 12. Комбінації кераміки та композитів проти $7.62 \times 54R$ Dragunov [16]

Броня (кераміка + підкладка)	Площа маси (кг/м ²)	Відносна маса	Відносна вартість
RHA	73	1	1
Al ₂ O ₃ + S2 скло	47	0.65	2.5
SiC + Kevlar-29	41	0.56	6.5
B ₄ C + Kevlar	32	0.43	11.2

З використанням легших матеріалів вагу броні можна зменшити більш ніж в 2,5 рази порівняно з RHA. Однак вартість броні зростає більш ніж у десять разів у міру зменшення ваги. Використовуючи ще легші підкладкові матеріали, такі як UHMWPE, та більш міцні кераміки, такі як TiB₂, вагу та товщину броні можна зменшити ще більше, але за ще вищою ціною.

Обговорення результатів. Отже, виходячи з цього, бронеелемент повинен поєднувати дві основні властивості: високу твердість поверхневого шару для руйнування загостреного носа кулі та достатню в'язкість для поглинання енергії удару без утворення тріщин. Ударна в'язкість, що визначається коефіцієнтом тріщиностійкості K_{IC} , допомагає локалізувати руйнування керамічного шару в зоні дії кулі, що дозволяє захисній структурі витримувати кілька попадань. Зі збільшенням K_{IC} також зростає розмір фрагментів у зоні руйнування, підвищуючи залишкову міцність кераміки та ефективніше гальмуючи кулю. Однак при використанні текстильної підкладки з високомодульних органічних волокон утримання великих фрагментів кераміки може ускладнитися через ріжучу дію гострих граней. Якщо ж енергопоглинаючу функцію виконує сам бронеелемент, демпферний шар залишається непошкодженим [17–19].

Швидкість проходження ударної хвилі в броне матеріалі залежить від його щільності та модуля пружності. Висока швидкість хвилі дозволяє швидко розсіювати енергію удару на великій площі та підвищує ступінь руйнування снаряда. Чим більше різниця у швидкості хвилі між матеріалом снаряда та бронею, тим сильніше буде пошкоджений снаряд. Для кераміки швидкість хвилі зростає зі збільшенням модуля пружності, однак для скломатеріалів найвищі показники мають алюмосилікатні склади літію з модулем пружності лише 74–94 ГПа. Це може бути обумовлено наявністю в структурі склокераміки

склофази, яка знижує механічні мікронапруги та допомагає заліковувати тріщини, що утворюються під час удару. Еластична скломатриця сприяє релаксації напруг і розсіюванню енергії, тому цей матеріал ефективно функціонує як демпферний шар.

Отже, склокомпозиційні матеріали ситалового типу, завдяки своїм властивостям, можуть використовуватися в броньованих системах типу «кераміка (енергоруїнівний шар) – ситал (енергоруїнівний та енергопоглинаючий шар) – полімер (енергопоглинаючий шар)».

Втілення цих принципів дозволить досягти необхідного рівня бронезахисту (4–6 клас за ДСТУ 8782:2018) із застосуванням бронеситалу як частини композиційного бронеелементу, зменшивши вагу і вартість у порівнянні з повністю керамічними варіантами. Конструкція основного бронеелемента може включати кілька частин (рис. 3).

При класифікації бронежилетів за рівнем стійкості до засобів ураження слід враховувати відповідні нормативні документи, такі як NIJ 0101.06, NIJ 0101.04 (США), HOSDB Body Armor Standards for UK Police (Велика Британія), TR Ballistische Schutzwesten (Німеччина), PN-V-87000:2011 (Польща).



Рисунок 3 – Схематичне зображення поперечного перерізу броньової плити

У лабораторних умовах було виготовлено склокомпозиційний матеріал за скляною технологією з додаванням діоксиду цирконію, стабілізованого ітрієм, як наповнювача. Діоксид цирконію діє як катализатор кристалізації, впливаючи на кількість і розмір кристалів у структурі матеріалу. Вузькі та високі піки екзофектів на термограмах зразка (рис. 4) свідчать про інтенсивне формування тонкодисперсної структури, що супроводжується об'ємною кристалізацією за підвищених температур, значно більш вираженою, ніж у вихідного скла.

Дослідження структури матеріалу (рис. 5) показало, що введення діоксиду цирконію, стабілізованого ітрієм, сприяє ущільненню структури та підсилює кристалізацію β -сподумену до 85 об. % після термічної обробки.

Забезпечення вогнестійкості склокерамічних матеріалів (рис. 6) дає їм здатність протистояти відкритому полум'ю без руйнування. Це робить їх придатними для використання в умовах бойових дій, де важлива швидка заміна захисних елементів техніки, пошкоджених вогнепальним чи осколковим ураженням.

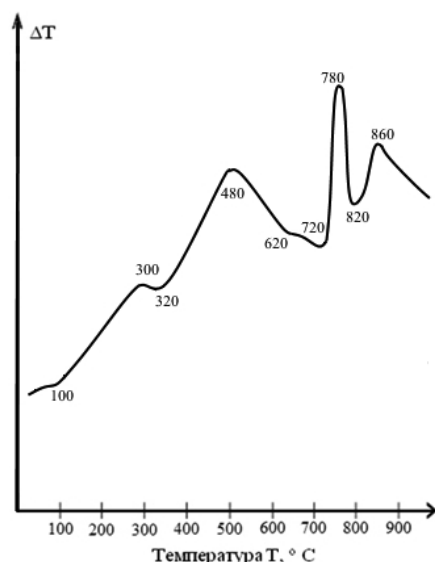


Рисунок 4 – Термограма зразка

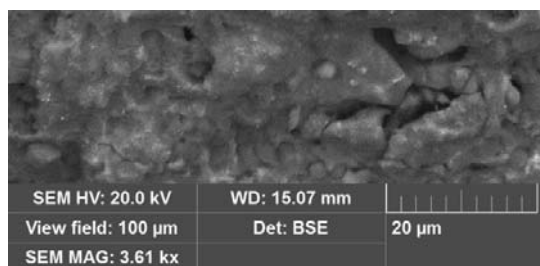


Рисунок 5 – Структура розробленого склокомпозиційного матеріалу

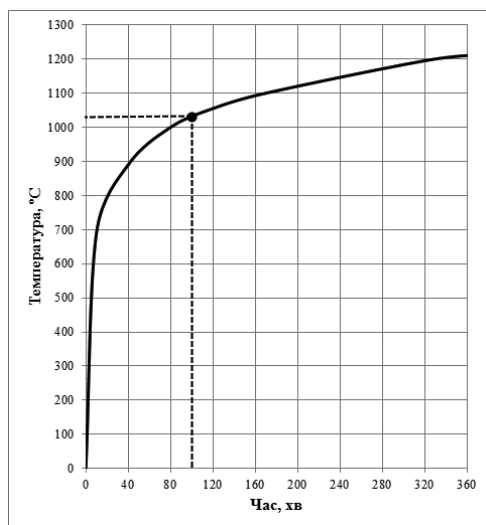


Рисунок 6 – Вогнестійкість розробленого склокристалічного матеріалу

Сподуменові ситали мають важливу конкурентну перевагу перед ситами на основі дисилікату літію завдяки нижчій вартості, яка зумовлена меншим вмістом оксиду літію. У порівнянні з анортитовими та іншими літійалюмосилікатними ситами вони відзначаються технологічністю через нижчі температури синтезу та спрощену технологію виробництва.

При виборі склокристалічного матеріалу для бронезахисного композиту необхідно враховувати не лише експлуатаційні та технологічні якості, але й вартість бронееlementів. З огляду на співвідношення "ціна: якість" матеріали на основі корунду та сподуменової склокераміки є оптимальними для використання в броньових композиціях.

Висока вартість керамічних матеріалів, таких як SiC, робить впровадження розроблених вітчизняних склокристалічних матеріалів економічно вигідним, оскільки дозволяє зменшити вартість бронееlementів майже втричі, підвищуючи їх конкурентоспроможність на світовому ринку.

Зниження щільності та підвищення тріщиностійкості розробленого склокристалічного матеріалу (табл. 13) порівняно з традиційними плитами на основі SiC (реакційно спечений карбід кремнію виробництва Saint-Gobain Ceramic Materials) дозволяє значно зменшити вагу бронькомпозитів.

Таблиця 13. Механічні властивості розроблених СКМ та відомого матеріалу для бронезахисту та їх характеристики ударостійкості та крихкості.

Дослідні матеріали	Отриманий зразок	SiC
HV, МПа	8,94	22–23
HK, ГПа	8,7	-
K_{IC} , МПа·м ^{1/2}	8,1	3–4
E, ГПа	320	375–420
ρ , кг/м ³	2410	3050–3150
v , км/с	13,27	11,9–13,8
M , ГПа ² ·м ³ ·кг ⁻¹	1,16	2,24
B , м ^{1/2}	1,1	5,5–7,6

Виходячи з цього, часткова заміна надтвердого керамічного бронееlementa на систему кераміка – СКМ – кевлар підвищує живучість броні при обстрілі і знижує загальну вагу.

Висновки. Порівняння властивостей розроблених склокристалічних матеріалів з відомими СКМ показало, що вони є перспективними для застосування як енергоруйнуючі та енергопоглинаючі складові в полегшених бронееlementах. Завдяки низькій щільності ($\rho = 2410$ кг/м³) розроблені матеріали можуть ефективно виконувати функції дроблячого та демпферного шарів у композиціях типу «корундова кераміка – склокомпозиційний матеріал – високомолекулярний поліетилен», забезпечуючи зниження ваги та вартості бронееlementів.

Дослідження показали, що об'ємне зміцнення склокристалічних матеріалів через додавання

стабілізованого діоксиду цирконію (ZrO_2 стабілізованого Y_2O_3) дозволяє отримати високі термомеханічні характеристики. За високими показниками термомеханічних властивостей ($K_{1C} = 8,1 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$; $HV = 8,94 \text{ ГПа}$; $E = 320 \text{ ГПа}$; $\nu = 13,27 \text{ км/с}$; $\rho = 2410 \text{ кг/м}^3$), ці матеріали є придатними для використання у полегшених бронеелементах індивідуального захисту з рівнем захисту 6 класу.

Синтезовані сподуменові склокомпозиційні матеріали, виготовлені методом пресування з використанням стабілізованого ZrO_2 , відповідають необхідним вимогам для виготовлення легких та ефективних бронеелементів, що робить їх конкурентоспроможними за співвідношенням «ціна: якість» у сфері захисних матеріалів для індивідуального захисту.

Список літератури

1. Fink B. K. Performance metrics for composite integral armor. *Journal of thermoplastic composite materials*, 2000. 13(5), 417–431. <https://doi.org/10.1106/FR0L-T33W-JPD0-VFH3>
2. Akella K. Multilayered Ceramic-Composites for Armour Applications. *Handbook of Advanced Ceramics and Composites*. Cham, 2019. P. 1–31. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-73255-8_11-1
3. Mahdi S., Gama B. A., Yarlagaadda S., Gillespie Jr J. W. (2003). Effect of the manufacturing process on the interfacial properties and structural performance of multi-functional composite structures. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 34(7), 635–647. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(03\)00091-5](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00091-5)
4. Gibson R. F. *Principles of composite material mechanics*. CRC press. 2016. <https://doi.org/10.1201/9781420014242>
5. Ernst H. J., Wiesner V., Wolf T. Armor ceramics under high-velocity impact of a medium-caliber long-rod penetrator. *Ceramic transactions*, 2002. 134, 23–31.
6. James B. Practical issues in ceramic armour design. *Ceramic transactions*, 2002. 134, 33–44.
7. Tam T., Bhatnagar, A. High performance ballistic fibers. *Lightweight ballistic composites*, 2006. 189–209. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845691554.2.189>
8. Song J. W. Fabrics and composites for ballistic protection of personnel. *Lightweight ballistic composites*, 2006. 210–239. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845691554.2.210>
9. Standard N. I. J. 0101.06. Ballistic resistance of body armor. *National Institute of Justice, US Department of Justice*, 2008.
10. Hannibal A., Weir B. Ballistic material processing. *Lightweight Ballistic Composites*, 2006. 305–335. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845691554.2.305>
11. Bhatnagar A., Lang D. Military and law enforcement applications of lightweight ballistic materials. *Lightweight Ballistic Composites*, 2006. 364–397. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845691554.2.364>
12. Hosur M. V., Vaidya U. K., Ulven C., Jeelani S. Performance of stitched/unstitched woven carbon/epoxy composites under high velocity impact loading. *Composite Structures*, 2004. 64(3–4), 455–466. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2003.09.046>
13. Udatha P., Sesha Kumar C. V., Nair N. S., Naik N. K. High velocity impact performance of three-dimensional woven composites. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2012. 47(7), 419–431. <https://doi.org/10.1177/0309324712448578>
14. Callister Jr, W. D., Rethwisch D. G. *Materials science and engineering: an introduction*. John Wiley & sons, 2020.
15. Pandya K. S., Pothnis J. R., Ravikumar G., Naik N. K. Ballistic impact behavior of hybrid composites. *Materials & Design*, 2013. 44, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.044>
16. Salame J. M., Quefelec B. Ceramic-faced molded armor. *Lightweight Ballistic Composites*, 2006. 398–415. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845691554.2.398>
17. Савцова О. В., Рябінін С. О., Воронов Г. К., Фесенко, О. І., Смирнова Ю. О. Дослідження впливу механічних властивостей на бронестійкість сподуменових склокристалічних матеріалів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*, 2020. 1, 33–37. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2020.01.07>
18. Савцова О. В., Рябінін С. О., Воронов Г. К., Фесенко О. І., Тимофеев В. Д. Сподуменвісні склокристалічні матеріали технічного призначення. *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки*, 2021. 121, 140–149. <https://doi.org/10.35857/2663-3566.121.15>
19. Рябінін С. О., Захаров А. В., Майзеліс А. О., Притиченко Г. В. Визначення перспективних напрямків вдосконалення матеріалів для індивідуального бронезахисту. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*, 2023. 2(10), 33–37. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2023.02.09>

References (transliterated)

1. Fink B. K. Performance metrics for composite integral armor. *Journal of thermoplastic composite materials*, 2000. 13(5), 417–431. <https://doi.org/10.1106/FR0L-T33W-JPD0-VFH3>
2. Akella K. Multilayered Ceramic-Composites for Armour Applications. *Handbook of Advanced Ceramics and Composites*. Cham, 2019. P. 1–31. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-73255-8_11-1
3. Mahdi S., Gama B. A., Yarlagaadda S., Gillespie Jr J. W. (2003). Effect of the manufacturing process on the interfacial properties and structural performance of multi-functional composite structures. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 34(7), 635–647. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(03\)00091-5](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00091-5)

4. Gibson R. F. *Principles of composite material mechanics*. CRC press. 2016. <https://doi.org/10.1201/9781420014242>
5. Ernst H. J., Wiesner V., Wolf T. Armor ceramics under high-velocity impact of a medium-caliber long-rod penetrator. *Ceramic transactions*, 2002. 134, 23–31.
6. James B. Practical issues in ceramic armour design. *Ceramic transactions*, 2002. 134, 33–44.
7. Tam T., Bhatnagar, A. High performance ballistic fibers. *Lightweight ballistic composites*, 2006. 189–209. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845691554.2.189>
8. Song J. W. Fabrics and composites for ballistic protection of personnel. *Lightweight ballistic composites*, 2006. 210–239. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845691554.2.210>
9. Standard N. I. J. 0101.06. Ballistic resistance of body armor. *National Institute of Justice, US Department of Justice*, 2008.
10. Hannibal A., Weir B. Ballistic material processing. *Lightweight Ballistic Composites*, 2006. 305–335. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845691554.2.305>
11. Bhatnagar A., Lang D. Military and law enforcement applications of lightweight ballistic materials. *Lightweight Ballistic Composites*, 2006. 364–397. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845691554.2.364>
12. Hosur M. V., Vaidya U. K., Ulven C., Jeelani S. Performance of stitched/unstitched woven carbon/epoxy composites under high velocity impact loading. *Composite Structures*, 2004. 64(3–4), 455–466. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2003.09.046>
13. Udatha P., Sesha Kumar C. V., Nair N. S., Naik N. K. High velocity impact performance of three-dimensional woven composites. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2012. 47(7), 419–431. <https://doi.org/10.1177/0309324712448578>
14. Callister Jr, W. D., Rethwisch D. G. *Materials science and engineering: an introduction*. John Wiley & sons, 2020.
15. Pandya K. S., Pothnis J. R., Ravikumar G., Naik N. K. Ballistic impact behavior of hybrid composites. *Materials & Design*, 2013. 44, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.044>
16. Salame J. M., Quefelec B. Ceramic-faced molded armor. *Lightweight Ballistic Composites*, 2006. 398–415. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845691554.2.398>
17. Savvova O. V., Riabinin S. O., Voronov H. K., Fesenko, O. I., Smyrnova Yu. O. Doslidzhennia vplyvu mekhanichnykh vlastyvostei na bronestiikist spodumenovykh sklokrystalichnykh materialiv. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia*, 2020. 1, 33–37. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2020.01.07>
18. Savvova O. V., Riabinin S. O., Voronov H. K., Fesenko O. I., Tymofieiev V. D. Spodumenvmisni sklokrystalichni materialy tekhnichnoho pryznachennia. *Naukovi doslidzhennia z vohnetryviv ta tekhnichnoi keramiky*, 2021. 121, 140–149. <https://doi.org/10.35857/2663-3566.121.15>
19. Riabinin S. O., Zakharov A. V., Maizelis A. O., Prytychenko H. V. Vyznachennia perspektyvnykh napriamkiv vdoskonalennia materialiv dlia individualnoho bronezakhystu. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia*, 2023. 2(10), 33–37. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2023.02.09>

Відомості про авторів /About authors

Рябінін Святослав Олександрович (Riabinin Sviatoslav) – доктор філософії, старший науковий співробітник кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2972-8540>; e-mail: riabinin_svytoslav@hotmail.com

Захаров Артем Вячеславович (Zakharov Artem) – кандидат технічних наук, заступник завідувача науково-дослідної частини НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0120-8263>; e-mail: artem.zakharov@khpi.edu.ua

Майстат Микита Сергійович (Maistat Mykyta) – доктор філософії, молодший науковий співробітник кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1875-3946>; e-mail: aichemict777@gmail.com

Лізеїн Станіслав Леонідович (Lihezin Stanislav) – доктор філософії, молодший науковий співробітник кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1097-1594>; e-mail: nik.cobold@gmail.com