

Рябінін С.О., Захаров А.В., Майстат М.С., Лігезін С.Л.

АДГЕЗИВНІ ШАРИ В КЕРАМІЧНИХ БРОНЬОВИХ СИСТЕМАХ: МАТЕРІАЛИ, МЕХАНІКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ДЛЯ БАГАТОУДАРНОЇ СТІЙКОСТІ

У статті систематизовано сучасні знання щодо ролі адгезивних шарів у багатошарових керамічних броньових системах та розглянуто їхній вплив на багатоударну балістичну ефективність. Розглянуто матеріали фронту (Al_2O_3 , SiC, B_4C) і підкладок (метали, UHMWPE, арамідні композити), класи адгезивів (епоксиди, модифіковані епоксиди, поліуретани/поліуреї, термопласти) та їхні критичні фізико-механічні параметри: модуль пружності, межі міцності, енергія руйнування (G_c), чутливість до швидкості деформації і акустичний імпеданс. Проаналізовано механізми взаємодії: хвильове відбиття/передача через імпедансні контрасти, в'язкопластична дисипація енергії, утримання керамічних фрагментів та ініціація тріщин. Особливо описано техніки підготовки поверхні (механічна абразія, плазма, силанізація, лазерна текстуризація), рецептурні підходи з наномодифікаціями (CSR, наносиліка, CNT/GNP, POSS) і практичні обмеження (агломерація, зміна реології). Узагальнено набір експериментальних методик: ієрархія випробувань від QC-тестів (lap-shear) через квазістатичні (DCB/ENF), високошвидкісні (SHPB, IWP) до балістичних (V50, multi-hit) з інтеграцією DIC для локальної ідентифікації полів деформації. Описано чисельні підходи і ролі NDE-стратегій у контролі якості. На підставі огляду сформульовано практичні рекомендації: оптимізація товщини та імпедансу адгезиву залежно від пари «фронт–підкладка», застосування комбінованих поверхневих обробок, включення зміцнювачів-агентів у рецептуру та впровадження стандартизованих multi-hit протоколів з NDE-контролем між пострілами. Визначено пріоритетні напрями подальших досліджень: багатомасштабне моделювання, довготривалі ageing-дослідження та публічні набори даних для валідації моделей. Стаття буде корисна дослідникам і практикам у галузі захисних матеріалів, інженерам-розробникам і виробникам броньових систем.

Ключові слова: адгезивні шари, керамічна броня; багатоударна стійкість; когезійні моделі, енергія руйнування, обробка поверхні, наномодифікації, неруйнівний контроль, чисельне моделювання, інверсне калібрування; оцінка невизначеностей

Актуальність дослідження. Зростаючий рівень загроз сучасних конфліктів та вимоги до мобільності й зменшення ваги броньованого захисту обумовлюють соціальний попит на легкі і ефективні броньові рішення [1, 2]. У відповідь на це виник попит на багатошарові броньові конструкції з керамічними фронтальними плитами і легкими підкладками (металевими чи полімерними). В таких системах адгезивний шар між керамікою та підкладкою займає центральну роль: він передає імпульс удару, контролює відліт уламків та сприяє дисипації енергії удару [2, 3]. Саме завдяки адгезивному шару ударна хвиля коректно передається на підкладку, а розширення і розтріскування кераміки частково стримуються [2, 3]. Таким чином, соціальна потреба у створенні легких, надійних бронеплит обумовлює необхідність ґрунтовного дослідження кожного компонента системи, зокрема оптимізації адгезивного шару [1, 4]. Для цього застосовується інтегрований підхід, що поєднує матеріалознавство, експерименти, чисельне моделювання і аналіз надійності [2, 5].

Постановка проблеми. Незважаючи на важливість адгезивного шару, в існуючих броньових рішеннях його роль часто недооцінюють. Недостатня увага до характеристик клею та технологій його нанесення призводить до непередбачуваної динамічної поведінки і зниження стійкості броні при багатоударних навантаженнях [6, 7]. Зокрема, показано, що навіть незначні зміни товщини адгезиву або енергії руйнування інтерфейсу G_c можуть суттєво змінити балістичний ліміт V50 системи [6]. Виробничі дефекти адгезивного шару (пористість, «сухі» контакти, локальні тонкі ділянки клею, залишкові напруження) істотно знижують міцність інтерфейсу і багатоударну стійкість броні [8, 9]. Такі дефекти часто виявляються лише після деградації показників V50, що ускладнює контроль якості. Крім того, відсутність стандартизованих процедур калібрування когезійних моделей і відкритих даних збільшує невизначеність при прогнозуванні поведінки системи [10, 11]. Тому виникає нагальна потреба в комплексному дослідженні адгезивних шарів – від базових матеріалів клею та їх властивостей до технологій нанесення і контролю якості.

Теоретичний аналіз літератури. У науковій літературі питання ролі адгезивного шару в броні розглядається з різних аспектів:

1) Експериментальні дослідження адгезиву показали, що параметри клею (модуль пружності, межа міцності, енергія руйнування) суттєво впливають на багатоударну балістичну поведінку керамічно-металевих систем [1, 6]. Інші дослідження експериментально підтверджують необхідність точної ідентифікації когезійних законів інтерфейсу для адекватного моделювання в таких системах [1, 3].

2) Багато праць присвячено порівнянню властивостей переднього шару кераміки (Al_2O_3 , SiC, B_4C) та матеріалів підкладок (сталі, Al-сплави, UHMWPE, арамід) [5, 12]. Ці роботи демонструють компроміс між

щільністю, модулем пружності і тріщиностійкістю. Наприклад, Al_2O_3 має високу жорсткість, але низьку K_{1C} (2–4 МПа·м^{0.5}), тоді як В4С забезпечує найвищу масову ефективність завдяки низькій густині (~2.5 г/см³) [4].

3) В оглядах наведено типові властивості основних класів клеїв: жорстких епоксидів, модифікованих епоксидів з зміцнювачами-агентами, поліуретанів/поліуреїв, термопластиків (PEEK, PAEK), полісульфідів тощо [13, 14]. Наприклад, звичайні епоксиди мають модуль ~1–5 ГПа і межу деформації 1–5%, тоді як модифіковані за рахунок нанодобавок можуть мати вищу витяжність і втягнення енергії [10, 15]. Поліуретани характеризуються наднизьким модулем (0.01–0.5 ГПа) і дуже високою витяжністю (100–500%), що забезпечує відмінну дисипацію енергії, але робить їх чутливими до вологи [16].

4) Для адгезивних шарів у броні рекомендовано ієрархію випробувань: від квазістатичних тестів (розтяг/зсув, DCB/ENF для вимірювання G_{IC}/G_{IIC}) через високошвидкісні (SHPB, Impact Wedge-Peel ISO11343) до балістичних (V50) [17, 18]. У літературі підкреслюють необхідність використовувати цифрову кореляцію зображень (DIC) у високошвидкісних DCB/ENF для калібрування залежних від швидкості когезійних параметрів [19, 20].

5) Для прогнозування балістики важливими є моделі із зонованим руйнуванням (CZM), що враховують залежність параметрів від швидкості деформації. Методи зворотнього калібрування цих моделей на основі комплексних випробувань (зокрема, інструментованих DCB/ENF і SHPB) описані в сучасних роботах [3, 21, 22]. Застосування сурогат-моделювання та UQ-підходів (surrogate models, Monte-Carlo, RBDO) дає змогу врахувати невизначеності параметрів при оптимізації рецептур і товщини клею [23].

6) Досліджуються різні NDE-техніки для виявлення дефектів адгезиву: нелінійна ультразвукова дефектоскопія, спрямовані хвилі, інфрачервона термографія, мікро-КТ та комбіновані підходи (MAPOD) [24–27]. В літературі [24, 25] відзначають, що найбільш чутливими до тонких «dry-bond» є нелінійні УЗ-методи, а комбінація методів із використанням моделі POD дозволяє оцінити ймовірність виявлення дефектів при виробництві.

Таким чином, існує велика кількість джерел, що охоплюють матеріали, властивості клеїв, методи випробувань та моделювання адгезивних шарів у броні. Усі наведені роботи враховані в цьому огляді, забезпечуючи комплексний аналіз проблеми.

Метою даної оглядової статті є систематизація сучасних знань щодо ролі адгезивних шарів у багатошарових керамічних броньових системах. Зокрема, стаття спрямована на аналіз матеріалів фронтальних і підкладних шарів, опис механіки та показників роботи клеїв, розгляд технологій підготовки поверхні та рецептурних підходів (включаючи наномодифікації), а також охоплення експериментальних протоколів (від квазістатичних до балістичних), чисельних моделей з їх інверсним калібруванням, стохастичних методів оцінки надійності та виробничих рекомендацій.

Задачі дослідження. З урахуванням мети статті формулюються такі основні науково-дослідні завдання:

1. Оцінити властивості передніх (керамічних) та підкладних (металевих і полімерних) матеріалів, їх щільність, жорсткість і тріщиностійкість [5, 12].

2. Описати функціональні ролі адгезивного шару при балістичних навантаженнях (передача імпульсу, контроль хвильового режиму, дисипація енергії, стримування уламків) [1, 2].

3. Систематизувати основні класи клеїв (жорсткі і модифіковані епоксиди, поліуретани, термопласти, інші) та порівняти їх механічні параметри (модуль E , граничні напруги, енергія руйнування, чутливість до швидкості деформації) [13, 14].

4. Розглянути методи підготовки поверхні (піскоструй, плазма, хімічна обробка, силанізація тощо) і технології нанесення адгезиву, а також їхній вплив на змочування, енергію поверхні і міцність зчеплення [28, 29].

5. Систематизувати набір експериментальних методів оцінки властивостей адгезиву: від квазістатичних тестів (розтяг, DCB/ENF) до високошвидкісних (SHPB, ISO11343) і балістичних випробувань (V50, multi-hit) [17, 18].

6. Описати типові дефекти адгезивного шару (пористість, «dry spots», забруднення, нерівномірна товщина, деламінація) та їхній вплив на стійкість системи; розглянути фактори експлуатаційної деградації (вологість, цикли навантаження, температура) [24, 25].

7. Зібрати наукові пріоритети та практичні рекомендації щодо оптимізації адгезивних систем, включно з розробкою стандартизованих процедур багатоударних випробувань, NDE-стратегій, розширених експериментальних програм та підходів до UQ/RBDO [21, 23].

Матеріали броньових систем та їх характеристики. Передні «фронтіві» плити зазвичай виготовляють із високотвердих керамік (Al_2O_3 , SiC, В4С) через їхню жорсткість і здатність до локальної фрагментації [4]. Підкладки можуть бути металевими (сталь, алюмінієві сплави, титанові сплави) чи полімерними (UHMWPE, арамід). У таблиці 1 наведено порівняння основних матеріалів за щільністю, модулем пружності та тріщиностійкістю K_{1C} . Наприклад, Al_2O_3 має високу густину (3.8–4.0 г/см³) і модуль (~300–380 ГПа), але малу K_{1C} (2–4 МПа·м^{0.5}), що призводить до крихкого кумулятивного руйнування; натомість В4С відрізняється найменшою щільністю (~2.5 г/см³) і високим модулем, але теж обмеженою тріщиностійкістю [5, 12]. Метали забезпечують високу пластичність і енергопоглинання, проте мають значно більшу масу (наприклад, сталь RHA: ~7.8–8.0 г/см³, модуль 200–220 ГПа, K_{1C} ~30–50 МПа·м^{0.5}) [6]. Композити типу UHMWPE та арамідів дають дуже низьку вагу і високу витяжність, але їхній модуль у напрямку волокон (5–15 ГПа) набагато нижчий за кераміку [6]. Таблиця 1 ілюструє ці властивості.

Таблиця 1

Порівняння матеріалів фронту та підкладок

Матеріал	Густина, г/см ³	Модуль Е, ГПа	K _{1с} , МПа·м ^{0.5}	Характер руйнування	Типове застосування
Al ₂ O ₃ (корунд)	3.8–4.0	300–380	2–4	Крихкий, утворення конуса/фрагментів	Фронтальні плити персональної броні (дешевші)
SiC	3.1–3.2	400–450	3–5	Висока твердість, кращий компроміс маса/ефективність	Фронтальні плити для бронетехніки
B ₄ C	≈2.5–2.6	400–450	2–4	Низька густина (висока масова ефективність), чутливий до домішок	Легкі високоефективні бронеплити
Сталь (RHA/HSLA)	7.8–8.0	200–220	~30–50	Пластична деформація (висока енергопоглинальна здатність), велика маса	Задні плити, корпусна броня
Al-сплави	2.7–2.9	70–80	~25	Легші за сталь, менша енергопоглинання	Легкі підкладки для мобільних платформ
Ti-сплави	4.4–4.5	110–120	~30	Добре співвідношення міцності та маси, вища вартість	Спеціальні застосування (авіація)
UHMWPE (Dyneema)	0.97–0.99	5–15 (уздовж.)	-	Дуже легкий, великі деформації, відмінне енергопоглинання	М'які підкладки (особиста броня)
Арамід (Kevlar, Twaron)	1.4	висока (волокна)	-	Висока ударна стійкість, чутливий до T/UV	М'які підкладки, гібридні ламінати

Функціональні ролі адгезиву. Адгезивний шар забезпечує кілька взаємопов'язаних функцій у броньовій системі. По-перше, він передає імпульс від керамічного фронту до підкладки, тобто приймає на себе контактні сили у момент удару [1, 11]. По-друге, адгезив визначає хвильовий режим: різниця акустичних імпедансів між шаром і підкладкою контролює відбиття і проходження компресійних/деформаційних хвиль, що впливає на локальні розтягувальні піки в кераміці [1]. По-третє, в'язкопластичні властивості клею дисипують енергію удару, зменшуючи максимальні напруги і гальмуючи розвиток тріщин у кераміці [2]. Нарешті, адгезив утримує фрагменти розбитої кераміки, перешкоджаючи їхньому відльоту і подальшому ушкодженню підкладки [13]. Виконання цих функцій залежить від властивостей клею (модуль Е, σ_{max} , G_c, SRS) і призводить до складної взаємодії нелінійних механічних процесів.

Класи клеїв і їх властивості. Існує декілька класів адгезивів, що застосовуються в бронетехніці. У таблиці 2 наведені їх типові механічні параметри та області застосування [14–16].

Таблиця 2

Характеристики основних класів адгезивів

Клас адгезиву	Е (ГПа)	ϵ_f , %	σ_f МПа	T _g	Коментар
Епоксиди (жорсткі)	1–5	1–5	20–60	80–160 °C	Висока жорсткість, потрібне зміцнення для багатударності
Тверді епоксиди + CSR, наносиліка	2–6	3–20	20–80	зростає з наповнювачем	Збільшують витяжність клею, вимагають безпористого формування
Поліуретани/поліуреї	0.01–0.5	100–500	1–20	низьке–середнє	Надвелика витяжність (енергодисипація); чутливі до вологості
Термопласти (PEEK, PAEK)	0.5–3	10–50	10–50	150–300 °C	Ремонтпридатні, висока термостійкість
Полісульфіди та інші	0.1–1	20–200	5–30	середнє	Спеціалізовані вузькі застосування

Жорсткі епоксидні адгезиви мають великий модуль (1–5 ГПа) і високу межу міцності (20–60 МПа) при відносно низькій деформації до руйнування (1–5%) [20]. Вони забезпечують міцне зчеплення, але потребують зміцнювачів-агентів (наприклад, CSR, нановолокна) для підвищення витяжності. Модифіковані епоксиди (CSR, наносиліка) мають дещо вищий модуль (2–6 ГПа) і значно більшу граничну деформацію (3–20%) [15, 30]. Це дозволяє краще поглинати енергію удару при умові, що відсутні порожнечі. У свою чергу, поліуретани і поліуреї характеризуються надзвичайно низьким модулем (0.01–0.5 ГПа) і великими деформаціями (100–500%), що

гарантує високий рівень дисипації енергії. Однак їхня вразливість до вологи і менша стійкість до стирання роблять їх придатними здебільшого для внутрішніх шарів, де потрібне стримування уламків [16]. Термопластичні адгезиви (PEEK, PAEK) поєднують помірну жорсткість (0.5–3 ГПа) і високу теплову стабільність (T_g 150–300°C) [29], що робить їх зручними для ремонтних робіт або високотемпературних застосувань. Інші клеї (полісульфіди тощо) використовуються у спеціалізованих ситуаціях [13, 14].

Методи проектування адгезивного інтерфейсу. На основі досліджень сформовані практичні правила проектування: слід підбирати товщину клею та його імпеданс відповідно до конкретної пари матеріалів фронту/підкладки і довжини хвилі балістичного удару [10, 11]. Зазвичай ефективні рецептури комбінують достатню жорсткість (щоб уникнути надмірних прогинів плитки) з елементами зміцнення (CSR, волоконні наповнювачі, функціональні нанопілері) для дисипації енергії [31, 32]. Крім того, ієрархія випробувань (QC – квазістатичні DCB/ENF + DIC – високошвидкісні SHPB/IWP – балістичний V50) забезпечує найповніші дані для калібрування комплексних моделей і розробки надійних прогностичних симуляцій [17–19].

Ключові властивості адгезиву. При моделюванні адгезивного шару вирішальними є параметри [21, 23]:

1. Модуль пружності E , що часто залежить від швидкості деформації.
2. Гранична напруга σ_{max} в нормальному і зсувному режимах.
3. Енергія руйнування G_c інтерфейсу для режимів Mode-I та Mode-II (інтеграл когезійної кривої).
4. Гранична деформація δ_f (втяжність клею).
5. Чутливість до швидкості (чутливість до швидкості деформації, SRS): залежності $E(\epsilon)$, $\sigma_{max}(\epsilon)$, $G_c(\epsilon)$, особливо для швидкостей 10^3 – 10^4 s^{-1} .
6. Акустичний імпеданс $Z = \rho c$, що визначає хвильовідбивання.

Ці параметри необхідно характеризувати при низьких і високих швидкостях деформації (квазістатичні – 10^4 s^{-1}), адже ударні навантаження породжують локальні швидкості деформацій та миттєве нагрівання, які сильно впливають на властивості полімерів [3, 33].

Методи оцінки властивостей адгезиву. Рекомендований набір випробувань включає [3, 17–19]:

1. Квазістатичний розтяг/сжаття: отримання базових кривих $\sigma(\epsilon)$ (ASTM/ISO-методики).
2. Lap-shear (ASTM D1002): швидкий QC-тест на зсувну міцність інтерфейсу.
3. DCB (Double Cantilever Beam, Mode-I): визначення G_c з методу compliance-based (CBBM).
4. ENF (End-Notched Flexure, Mode-II): доповнює DCB для побудови mixed-mode envelope.
5. IWP (Impact Wedge-Peel, ISO 11343): динамічний cleavage-тест, «міст» між квазістатичним та балістичним режимами.
6. SHPB (Kolsky bar) з модифікованими зразками: визначення властивостей клею при швидкостях 10^3 – 10^4 s^{-1} , побудова SRS-законів для матриці клею.
7. Інструментовані високошвидкісні DCB/ENF + DIC: швидкісні варіанти Mode-I/II для прямої калібровки gate-dependent CZM; DIC дає поля розкриття тріщини і деформацій.
8. Балістичні випробування V50, multi-hit (за протоколами NIJ/VPAM): остаточна валідація продуктивності системи; необхідні для підтвердження кінцевої поведінки в умовах реального удару.

Для коректного перенесення даних у чисельну модель бажано отримати як глобальні криві навантаження-реакція, так і локальні поля деформацій (через DIC), що підвищує ідентифікацію когезійних параметрів [19, 34].

Дефекти та деградація адгезиву. Практичні броньові конструкції можуть мати різні дефекти в адгезивному шарі [24, 25]. Серед найнебезпечніших – пористість, що виникає через недостатню дегазацію клею; вона призводить до зменшення контактної площі і концентрації напружень. Kissing-bonds (контакти без адгезії) практично не втримують зусиль, але при цьому не утворюють відкритих тріщин, що ускладнює їх виявлення; водночас вони критично знижують міцність інтерфейсу при ударі [24]. Забруднення поверхонь (масла, абразивні залишки) змінюють властивості зчеплення, зменшуючи G_c . Нерівномірна товщина клею викликає концентрацію зсувних/згинальних напружень і знижує запас міцності в окремих зонах. Усі ці дефекти [15, 32] можуть поєднуватися нелінійним чином: сумарний вплив їх зазвичай перевищує просту суму окремих ефектів.

Експлуатаційні фактори. Під час експлуатації адгезивний шар піддається впливу середовища. Наприклад, проникнення вологи призводить до пластифікації полімеру: зниження T_g , модуля E і енергії руйнування [41]. Температурні цикли і тривалі навантаження можуть спричинити кумулятивну деградацію клею. Це зменшує його ефективність з часом, тому довготривалі експерименти з температурним та вологим старінням рекомендовані для остаточних виробничих рішень [27, 35].

Неруйнівний контроль (NDE). Для виявлення дефектів адгезиву застосовують ультразвукові, інфрачервоні та рентгенівські методи [24, 26, 27]. Наприклад, нелінійна ультразвукова дефектоскопія показала найкращу чутливість до тонких «kissing-bonds», тоді як комбіновані стратегії (ультразвук + ІЧ-термографія + μ СТ із MAPOD) підвищують ймовірність виявлення різних дефектів. Термічні методи дають швидкий огляд великих площ (чутливі до пористості), а мікро-КТ забезпечує високу просторову роздільність (для детального огляду вибіроків зразків). Важливою тенденцією є використання моделі POD для кількісного зв'язку ймовірності виявлення з ймовірністю відмови, що дозволяє планувати контроль якості на виробництві. Крім того, інструментовані швидкісні випробування із DIC сприяють калібруванню змінних у часі параметрів моделі адгезиву.

Висновки. Встановлено, що властивості адгезивного шару (модуль E , межа міцності σ_{max} , енергія руйнування G_c , SRS) суттєво впливають на передачу імпульсу та енергодисипацію в багатшаровій системі.

Навіть незначні зміни G_c чи товщини шару можуть змінити балістичний ліміт V50 та поведінку при багатоударних навантаженнях.

Найкраща балістична стійкість досягається при збалансованому імпедансі адгезиву з матеріалами фронту та підкладки. Великий імпедансний контраст призводить до надмірного відбиття компресійних хвиль і утворення сильних розтягувальних піків у кераміці. Правильний підбір імпедансу та контроль товщини клею (з урахуванням довжини хвилі ударного імпульсу) пом'якшує ці ефекти і підвищує стійкість до багатоударів.

Комбіновані методи обробки (механічне шліфування + плазмова чи хімічна активація + силанізація) забезпечують найвищу початкову адгезію і довготривалу стабільність. Водночас суворий контроль процесу (регулювання пористості, уникнення контамінації, підтримання рівномірної товщини) є необхідним: його відсутність часто стає причиною деградації показників V50 у виробництві.

Введення наночастинок (nanosilica, CSR, CNT/GNP, POSS) здатне значно підвищувати G_c і втомостійкість клеїв. Проте агломерація і зміни реології обмежують їхнє масове використання. Тому для практичних рецептур потрібні експериментальні оптимізації (DoE) та технології надійного диспергування.

Для забезпечення переносимості результатів в балістику рекомендується поетапний підхід до тестування: QC – квазістатичні (DCB/ENF + DIC) – високошвидкісні (SHPB, IWP) – балістичні (V50, multi-hit). Зворотне калібрування когезійних законів (CZM) з використанням інструментованих даних (і сурогатних моделей) дає фізично осмислені, залежні від швидкості параметри для прогнозних симуляцій.

Комбінація нелінійних ультразвукових методів, інфрачервоної термографії, μ СТ (для вибіркових зразків) і використання моделі POD дозволяє кількісно пов'язати ймовірність виявлення дефекту з імовірністю відмови і реалізувати контроль якості на виробництві. Використання surrogate-моделей та UQ/RBDO (разом з Monte-Carlo симуляціями) робить можливими оптимізацію товщини клею і рецептур з урахуванням невизначеностей та обмежень за надійністю.

Необхідно розвивати багатомасштабні моделі, стандартизовані multi-hit випробування з NDE-контролем між пострілами, довготривалі дослідження старіння в реальних умовах, а також формувати відкриті набори даних для валідації моделей. Це дозволить зменшити невизначеності та прискорити впровадження оптимізованих адгезивних систем у виробництво.

Для розробників і виробників запропоновано мінімальний пакет випробувань для нових рецептів (QC – DCB/ENF – SHPB/IWP – V50), детальне документування підготовки поверхні і режимів твердіння. Рекомендується використовувати гібридні рецептури (наприклад, CSR + наносиліка \pm незначні GNP/CNT) з оптимізацією концентрацій через DoE. Перед впровадженням необхідно перевіряти NDE-стратегію (з MAPOD) та гарантувати достатню імовірність виявлення ключових дефектів (kissing-bonds, пористість). Крім того, впровадження UQ/RBDO підходів дозволить оптимізувати товщину клею і рецептури з урахуванням обмежень на ймовірність відмови.

Інтегрований підхід, що поєднує матеріалознавство, інженерію поверхні, комплексне тестування, фізично обґрунтоване моделювання та стохастичний аналіз, є єдиним реалістичним шляхом до створення легких, надійних і багатоударних керамічних броньових систем. Успіх залежить не лише від «нових матеріалів», а від їх правильного поєднання та контролю в реальному виробничому циклі.

Література

1. Shen Y., Wang Y., Zhang Y., Bizzocchi N.R., Keller J.B., Li J., Lu X., Zhao B., Xue Z. Effects of the adhesive layer on the multi-hit ballistic performance of ceramic/metal composite armors // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Т.13. – С.1496–1508. – doi:10.1016/j.jmrt.2021.05.058.
2. Nunes T., Ribas M.J.P., Akhavan-Safar A., Carbas R.J.C., Marques E.A.S., Wenig S., da Silva L.F.M. Fracture analysis of highly flexible adhesives: cohesive zone modelling across a wide spectrum of temperatures and strain rates // *Polymers*. – 2024. – Т.16, №.16. – С.2383. – doi:10.3390/polym16162383.
3. Pereira F., Dourado N., Morais J.J.L., de Moura M.F.S.F. A new method for the identification of cohesive laws under pure loading modes // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2022. – Т.271. – С.108594. – doi:10.1016/j.engfracmech.2022.108594.
4. Dresch A.B., Venturini J., Arcaro S., Montedo O.R.K., Bergmann C.P. Ballistic ceramics and analysis of their mechanical properties for armour applications: a review // *Ceramics International*. – 2021. – Т.47, №.7. – С.8743–8761. – doi:10.1016/j.ceramint.2020.12.095.
5. Fejdyś M., Kośła K., Kucharska-Jastrzābek A., Łandwajt M. Influence of ceramic properties on the ballistic performance of the hybrid ceramic–multi-layered UHMWPE composite armour // *Journal of the Australian Ceramic Society*. – 2021. – Т.57. – С.149–161. – doi:10.1007/s41779-020-00516-7.
6. Zhang W. A review of tribological properties for boron carbide ceramics // *Progress in Materials Science*. – 2021. – Т.116. – С.100718. – doi:10.1016/j.pmatsci.2020.100718.
7. Ramesh K.T. Fragmentation of an advanced ceramic under ballistic impact: mechanisms and microstructure // *International Journal of Impact Engineering*. – 2017. – Т.102. – С.47–54. – doi:10.1016/j.ijimpeng.2016.12.008.
8. Dou L., He L., Yin Y., Li Y. Numerical investigation into the influence of thickness ratio and lateral size of ceramic on the ballistic performance of ceramic/metal armor // *Journal of Ceramic Science and Technology*. – 2023. – Т.14, №.2. – С.55–72. – doi:10.4416/JCST2023-00004.

9. Bian J., Dai K., Lv X., Huang Z., Wu G., Zhang Y. Effect of material and structure of ultra-high-molecular-weight polyethylene body armor on ballistic limit velocity: numerical simulation // *Polymers*. – 2024. – T.16, №.21. – C.2985. – doi:10.3390/polym16212985.
10. López-Puente J., Arias A., Zaera R., Navarro C. The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours: an experimental and numerical study // *International Journal of Impact Engineering*. – 2005. – T.32, №.1–4. – C.321–336. – doi:10.1016/j.ijimpeng.2005.07.014.
11. Guo X., Sun X., Tian X., Weng G.J., Ouyang Q.D., Zhu L.L. Simulation of ballistic performance of a two-layered structure of nanostructured metal and ceramic // *Composite Structures*. – 2016. – T.157. – C.163–173. – doi:10.1016/j.compstruct.2016.08.025.
12. Luz F.S.D., Garcia Filho F.D.C., Oliveira M.S., Nascimento L.F.C., Monteiro S.N. Composites with natural fibers and conventional materials applied in a hard armor: a comparison // *Polymers*. – 2020. – T.12, №.9. – C.1920. – doi:10.3390/polym12091920.
13. Si P., Liu Y., Yan J., Bai F., Huang F. Ballistic performance of polyurea-reinforced ceramic/metal armor subjected to projectile impact // *Materials*. – 2022. – T.15, №.11. – C.3918. – doi:10.3390/ma15113918.
14. Scazzosi R., Giglio M., Manes A. FE coupled to SPH numerical model for the simulation of high-velocity impact on ceramic based ballistic shields // *Ceramics International*. – 2020. – T.46, №.15. – C.23760–23772. – doi:10.1016/j.ceramint.2020.06.151.
15. Sprenger S. Nanosilica-toughened epoxy resins // *Polymers*. – 2020. – T.12, №.8. – C.1777. – doi:10.3390/polym12081777.
16. Toader G., Diacon A., Axinte S.M., Mocanu A., Rusen E. State-of-the-art polyurea coatings: synthesis aspects, structure–property relationships and applications for protective systems // *Polymers*. – 2024. – T.16, №.4. – C.454. – doi:10.3390/polym16040454.
17. International Organization for Standardization. ISO 11343:2019 – Adhesives – Determination of dynamic resistance to cleavage of high-strength adhesive bonds under impact wedge conditions – Wedge impact method. – Geneva: ISO, 2019. – Доступно за адресою: <https://www.iso.org/standard/75628.html>.
18. ASTM International. ASTM D1002 – Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal). – West Conshohocken, PA: ASTM, 2019. – Доступно за адресою: <https://www.astm.org/d1002-10r19.html>.
19. Jackson C.M., McGuire J.A., Losada M.E., Maskery I., Ashcroft I., De Vita R., Dillard D.A. Using cohesive zone models with digital image correlation to obtain a mixed mode I/II fracture envelope of a tough epoxy // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2024. – T.295. – C.109732. – doi:10.1016/j.engfracmech.2023.109732.
20. Chae G.-S., Park H.-W., Lee J.-H., Shin S. Comparative study on the impact wedge-peel performance of epoxy-based structural adhesives modified with different toughening agents // *Polymers*. – 2020. – T.12, №.7. – C.1549. – doi:10.3390/polym12071549.
21. Linke M., Lammering R. On the calibration of the cohesive strength for cohesive zone models in finite element analyses // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2023. – T.124. – C.103733. – doi:10.1016/j.tafmec.2022.103733.
22. Shi T., Pang M., Wang Y., Zhang Y. Inverse parameter identification framework for cohesive zone models based on multi-island genetic algorithm // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2024. – C.110005. – doi:10.1016/j.engfracmech.2024.110005.
23. Wang C., Qiang X., Xu M., Wu T. Recent advances in surrogate modeling methods for uncertainty quantification and propagation // *Symmetry*. – 2022. – T.14, №.6. – C.1219. – doi:10.3390/sym14061219.
24. Jasiūnienė E., Yilmaz B., Smagulova D., Bhat G.A., Cicėnas V., Žukauskas E., Mažeika L. Non-destructive evaluation of the quality of adhesive joints using ultrasound, X-ray, and feature-based data fusion // *Applied Sciences*. – 2022. – T.12, №.24. – C.12930. – doi:10.3390/app122412930.
25. Omairey S., Jayasree N., Kazilas M. Defects and uncertainties of adhesively bonded composite joints // *SN Applied Sciences*. – 2021. – T.3, №.9. – C.769. – doi:10.1007/s42452-021-04753-8.
26. Guo X., Mao Y. Defect identification based on parameter estimation of histogram in ultrasonic IR thermography // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2015. – T.58. – C.218–227. – doi:10.1016/j.ymsp.2014.12.011.
27. Yilmaz B., Smagulova D., Jasiuniene E. Model-assisted reliability assessment for adhesive bonding quality evaluation with ultrasonic NDT // *NDT & E International*. – 2022. – T.126. – C.102596. – doi:10.1016/j.ndteint.2021.102596.
28. De Zanet A., Casalegno V., Salvo M. Laser surface texturing of ceramics and ceramic composite materials – a review // *Ceramics International*. – 2021. – T.47, №.6. – C.7307–7320. – doi:10.1016/j.ceramint.2020.11.146.
29. Matinlinna J.P., Lung C.Y.K., Tsoi J.K.H. Silane adhesion mechanism in dental applications and surface treatments: a review // *Dental Materials*. – 2018. – T.34, №.1. – C.13–28. – doi:10.1016/j.dental.2017.09.002.
30. Branda F., Grappa R., Costantini A., Luciani G. Sol–gel approach for fabricating silica/epoxy nanocomposites // *Polymers*. – 2023. – T.15, №.14. – C.2987. – doi:10.3390/polym15142987.
31. Quan D., Ivankovic A. Effect of core–shell rubber (CSR) nano-particles on mechanical properties and fracture toughness of an epoxy polymer // *Polymer*. – 2015. – T.66. – C.16–28. – doi:10.1016/j.polymer.2015.04.002.
32. Barra G., Vertuccio L., Vietri U., Naddeo C., Hadavinia H., Guadagno L. Toughening of epoxy adhesives by combined interaction of carbon nanotubes and silsesquioxanes // *Materials*. – 2017. – T.10, №.10. – C.1131. – doi:10.3390/ma10101131.

33. Challita G., Othman R. Finite-element analysis of SHPB tests on double-lap adhesive joints // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2010. – T.30, №.4. – C.236–244. – doi:10.1016/j.ijadhadh.2010.01.005.
34. Santos J.P., Correia D.S., Marques E.A., Carbas R.J., Gilbert F., da Silva L.F. Extended finite element method (XFEM) model for the damage mechanisms present in joints bonded using adhesives doped with inorganic fillers // *Materials*. – 2023. – T.16, №.23. – C.7499. – doi:10.3390/ma16237499.
35. Velho H.C., da Rosa L.S., Temp R.W., Cocco F.M., Pereira G.K.R., May L.G., Valandro L.F. Adhesive application after ceramic surface treatment is detrimental to load-bearing capacity under fatigue of a lithium disilicate glass-ceramic // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2022. – T.135. – C.105453. – doi:10.1016/j.jmbbm.2022.105453.

References

1. Shen Y., Wang Y., Zhang Y., Bizzocchi N.R., Keller J.B., Li J., Lu X., Zhao B., Xue Z. Effects of the adhesive layer on the multi-hit ballistic performance of ceramic/metal composite armors // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – T.13. – S.1496–1508. – doi:10.1016/j.jmrt.2021.05.058.
2. Nunes T., Ribas M.J.P., Akhavan-Safar A., Carbas R.J.C., Marques E.A.S., Wenig S., da Silva L.F.M. Fracture analysis of highly flexible adhesives: cohesive zone modelling across a wide spectrum of temperatures and strain rates // *Polymers*. – 2024. – T.16, №.16. – S.2383. – doi:10.3390/polym16162383.
3. Pereira F., Dourado N., Morais J.J.L., de Moura M.F.S.F. A new method for the identification of cohesive laws under pure loading modes // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2022. – T.271. – S.108594. – doi:10.1016/j.engfracmech.2022.108594.
4. Dresch A.B., Venturini J., Arcaro S., Montedo O.R.K., Bergmann C.P. Ballistic ceramics and analysis of their mechanical properties for armour applications: a review // *Ceramics International*. – 2021. – T.47, №.7. – S.8743–8761. – doi:10.1016/j.ceramint.2020.12.095.
5. Fejdyś M., Kośła K., Kucharska-Jastrzębek A., Łandwajt M. Influence of ceramic properties on the ballistic performance of the hybrid ceramic–multi-layered UHMWPE composite armour // *Journal of the Australian Ceramic Society*. – 2021. – T.57. – S.149–161. – doi:10.1007/s41779-020-00516-7.
6. Zhang W. A review of tribological properties for boron carbide ceramics // *Progress in Materials Science*. – 2021. – T.116. – S.100718. – doi:10.1016/j.pmatsci.2020.100718.
7. Ramesh K.T. Fragmentation of an advanced ceramic under ballistic impact: mechanisms and microstructure // *International Journal of Impact Engineering*. – 2017. – T.102. – S.47–54. – doi:10.1016/j.ijimpeng.2016.12.008.
8. Dou L., He L., Yin Y., Li Y. Numerical investigation into the influence of thickness ratio and lateral size of ceramic on the ballistic performance of ceramic/metal armor // *Journal of Ceramic Science and Technology*. – 2023. – T.14, №.2. – S.55–72. – doi:10.4416/JCST2023-00004.
9. Bian J., Dai K., Lv X., Huang Z., Wu G., Zhang Y. Effect of material and structure of ultra-high-molecular-weight polyethylene body armor on ballistic limit velocity: numerical simulation // *Polymers*. – 2024. – T.16, №.21. – S.2985. – doi:10.3390/polym16212985.
10. López-Puente J., Arias A., Zaera R., Navarro C. The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours: an experimental and numerical study // *International Journal of Impact Engineering*. – 2005. – T.32, №.1–4. – S.321–336. – doi:10.1016/j.ijimpeng.2005.07.014.
11. Guo X., Sun X., Tian X., Weng G.J., Ouyang Q.D., Zhu L.L. Simulation of ballistic performance of a two-layered structure of nanostructured metal and ceramic // *Composite Structures*. – 2016. – T.157. – S.163–173. – doi:10.1016/j.compstruct.2016.08.025.
12. Luz F.S.D., Garcia Filho F.D.C., Oliveira M.S., Nascimento L.F.C., Monteiro S.N. Composites with natural fibers and conventional materials applied in a hard armor: a comparison // *Polymers*. – 2020. – T.12, №.9. – S.1920. – doi:10.3390/polym12091920.
13. Si P., Liu Y., Yan J., Bai F., Huang F. Ballistic performance of polyurea-reinforced ceramic/metal armor subjected to projectile impact // *Materials*. – 2022. – T.15, №.11. – S.3918. – doi:10.3390/ma15113918.
14. Scazzosi R., Giglio M., Manes A. FE coupled to SPH numerical model for the simulation of high-velocity impact on ceramic based ballistic shields // *Ceramics International*. – 2020. – T.46, №.15. – S.23760–23772. – doi:10.1016/j.ceramint.2020.06.151.
15. Sprenger S. Nanosilica-toughened epoxy resins // *Polymers*. – 2020. – T.12, №.8. – S.1777. – doi:10.3390/polym12081777.
16. Toader G., Diacon A., Axinte S.M., Mocanu A., Rusen E. State-of-the-art polyurea coatings: synthesis aspects, structure–property relationships and applications for protective systems // *Polymers*. – 2024. – T.16, №.4. – S.454. – doi:10.3390/polym16040454.
17. International Organization for Standardization. ISO 11343:2019 – Adhesives – Determination of dynamic resistance to cleavage of high-strength adhesive bonds under impact wedge conditions – Wedge impact method. – Geneva: ISO, 2019. – Dostupno za adresoiu: <https://www.iso.org/standard/75628.html>.
18. ASTM International. ASTM D1002 – Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal). – West Conshohocken, PA: ASTM, 2019. – Dostupno za adresoiu: <https://www.astm.org/d1002-10r19.html>.

19. Jackson C.M., McGuire J.A., Losada M.E., Maskery I., Ashcroft I., De Vita R., Dillard D.A. Using cohesive zone models with digital image correlation to obtain a mixed mode I/II fracture envelope of a tough epoxy // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2024. – T.295. – S.109732. – doi:10.1016/j.engfracmech.2023.109732.
20. Chae G.-S., Park H.-W., Lee J.-H., Shin S. Comparative study on the impact wedge-peel performance of epoxy-based structural adhesives modified with different toughening agents // *Polymers*. – 2020. – T.12, №.7. – S.1549. – doi:10.3390/polym12071549.
21. Linke M., Lammering R. On the calibration of the cohesive strength for cohesive zone models in finite element analyses // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2023. – T.124. – S.103733. – doi:10.1016/j.tafmec.2022.103733.
22. Shi T., Pang M., Wang Y., Zhang Y. Inverse parameter identification framework for cohesive zone models based on multi-island genetic algorithm // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2024. – S.110005. – doi:10.1016/j.engfracmech.2024.110005.
23. Wang C., Qiang X., Xu M., Wu T. Recent advances in surrogate modeling methods for uncertainty quantification and propagation // *Symmetry*. – 2022. – T.14, №.6. – S.1219. – doi:10.3390/sym14061219.
24. Jasiūnienė E., Yilmaz B., Smagulova D., Bhat G.A., Cicėnas V., Žukauskas E., Mažeika L. Non-destructive evaluation of the quality of adhesive joints using ultrasound, X-ray, and feature-based data fusion // *Applied Sciences*. – 2022. – T.12, №.24. – S.12930. – doi:10.3390/app122412930.
25. Omairey S., Jayasree N., Kazilas M. Defects and uncertainties of adhesively bonded composite joints // *SN Applied Sciences*. – 2021. – T.3, №.9. – S.769. – doi:10.1007/s42452-021-04753-8.
26. Guo X., Mao Y. Defect identification based on parameter estimation of histogram in ultrasonic IR thermography // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2015. – T.58. – S.218–227. – doi:10.1016/j.ymsp.2014.12.011.
27. Yilmaz B., Smagulova D., Jasiuniene E. Model-assisted reliability assessment for adhesive bonding quality evaluation with ultrasonic NDT // *NDT & E International*. – 2022. – T.126. – S.102596. – doi:10.1016/j.ndteint.2021.102596.
28. De Zanet A., Casalegno V., Salvo M. Laser surface texturing of ceramics and ceramic composite materials – a review // *Ceramics International*. – 2021. – T.47, №.6. – S.7307–7320. – doi:10.1016/j.ceramint.2020.11.146.
29. Matinlinna J.P., Lung C.Y.K., Tsoi J.K.H. Silane adhesion mechanism in dental applications and surface treatments: a review // *Dental Materials*. – 2018. – T.34, №.1. – S.13–28. – doi:10.1016/j.dental.2017.09.002.
30. Branda F., Grappa R., Costantini A., Luciani G. Sol–gel approach for fabricating silica/epoxy nanocomposites // *Polymers*. – 2023. – T.15, №.14. – S.2987. – doi:10.3390/polym15142987.
31. Quan D., Ivankovic A. Effect of core–shell rubber (CSR) nano-particles on mechanical properties and fracture toughness of an epoxy polymer // *Polymer*. – 2015. – T.66. – S.16–28. – doi:10.1016/j.polymer.2015.04.002.
32. Barra G., Vertuccio L., Vietri U., Naddeo C., Hadavinia H., Guadagno L. Toughening of epoxy adhesives by combined interaction of carbon nanotubes and silsesquioxanes // *Materials*. – 2017. – T.10, №.10. – S.1131. – doi:10.3390/ma10101131.
33. Challita G., Othman R. Finite-element analysis of SHPB tests on double-lap adhesive joints // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2010. – T.30, №.4. – S.236–244. – doi:10.1016/j.ijadhadh.2010.01.005.
34. Santos J.P., Correia D.S., Marques E.A., Carbas R.J., Gilbert F., da Silva L.F. Extended finite element method (XFEM) model for the damage mechanisms present in joints bonded using adhesives doped with inorganic fillers // *Materials*. – 2023. – T.16, №.23. – S.7499. – doi:10.3390/ma16237499.
35. Velho H.C., da Rosa L.S., Temp R.W., Cocco F.M., Pereira G.K.R., May L.G., Valandro L.F. Adhesive application after ceramic surface treatment is detrimental to load-bearing capacity under fatigue of a lithium disilicate glass-ceramic // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2022. – T.135. – S.105453. – doi:10.1016/j.jmbbm.2022.105453.

The article systematizes current knowledge on the role of adhesive layers in multilayer ceramic armor systems and examines their influence on multi-hit ballistic performance. It reviews the materials used for the front face (Al₂O₃, SiC, B₄C) and backing layers (metals, UHMWPE, aramid composites), classes of adhesives (epoxies, modified epoxies, polyurethanes/polyureas, thermoplastics), and their critical physico-mechanical parameters, including elastic modulus, strength limits, fracture energy (G_c), strain-rate sensitivity, and acoustic impedance. Interaction mechanisms are analyzed, such as wave reflection/transmission through impedance mismatches, viscoplastic energy dissipation, ceramic fragment retention, and crack initiation. Surface preparation techniques (mechanical abrasion, plasma, silanization, laser texturing), formulation strategies with nanomodifications (CSR, nanosilica, CNT/GNP, POSS), and practical constraints (agglomeration, rheology changes) are described. A comprehensive set of experimental methodologies is outlined, ranging from QC tests (lap-shear), quasi-static (DCB/ENF), high-rate (SHPB, IWP), to ballistic (V50, multi-hit), with digital image correlation (DIC) integration for local strain field analysis. Numerical approaches and the role of non-destructive evaluation (NDE) strategies in quality control are also discussed. Based on the review, practical recommendations are proposed: optimizing adhesive thickness and impedance based on the front–backing material pair, applying combined surface treatments, including toughening agents in adhesive formulations, and implementing standardized multi-hit protocols with inter-shot NDE control. Priority research directions are outlined, including multiscale modeling, long-term aging studies, and the creation of public datasets for model validation. This article will be useful for researchers and practitioners in the field of protective materials, design engineers, and armor system manufacturers.

Keywords: *adhesive layers, ceramic armor, multi-hit resistance, cohesive zone models, fracture energy, surface treatment, nanomodifications, non-destructive evaluation, numerical modeling, inverse calibration, uncertainty quantification*

Рябінін С.О. – PhD, с.н.с. кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Захаров А.В. – к.т.н., заступник завідувача науково-дослідної частини Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Майстат М.С. – PhD, м.н.с. кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Лігезін С.Л. – PhD, м.н.с. кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Стаття надійшла до редакції: 27.11.2025 р.

Стаття прийнята до друку: 28.11.2025 р.

Стаття опублікована: 09.12.2025 р.