

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 666.762.93

Вплив конструктивно-технологічних факторів на ефективність бронееlementів на основі кераміки

Л. Р. Вишняков, О. В. Мазна, О. В. Нешпор, В. О. Коханий, О. Н. Олексюк

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ, Україна

Наведено результати експериментальної оцінки захисних властивостей керамічних пластин за питомим імпульсом енергії індентора з урахуванням їх щільності та товщини. Показано переваги кераміки з реакційно-спеченого карбїду кремнію для серійного випуску бронееlementів. За даними модельних експериментів встановлено раціональні розміри площі керамічних пластин та особливості їх використання разом із полімерним композитом на основі параарамідних тканин.

Ключові слова: композиційний бронееlement, керамічні пластини, деформування, руйнування, питомий імпульс, мозаїчна конструкція.

У конструкціях сучасних бронезилетів можуть використовуватися бронееlementи, що складаються з керамічних пластин, поєднаних із композиційними підпорами з просочених полімерами параарамідних тканин.

При виготовленні підпорів для таких бронееlementів використовують, наприклад, високоміцні параарамідні волокна типу “Kevlar” та “Tvaron”, високомодульні поліетиленові волокна типу “Dyneema” або “Spectra Shield” та ін. Зв’язуючим для композиційного підпору можуть слугувати поліуретанові, поліефірні, винїлефірні та бісмалеїмідні смоли, термопласти. Великий вибір вихідних матеріалів розширює можливості розробки броні із заданими властивостями: оптимальна вага, стійкість до ударного навантаження, демпфіруючі характеристики та ін. [1].

В якості бронекераміки використовують, головним чином, карбїд кремнію, карбїд бору, оксид алюмінію, а також нітрид кремнію, диборид титану та деякі інші сполуки. Із порівняльних характеристик керамічних матеріалів (табл. 1) видно, що за найменшої ваги достатньо високі властивості має карбїд бору (B_4C). Проте, він має високу вартість та складну технологію виготовлення (гаряче пресування у високоміцній графітовій оснастці). Важливі переваги перед B_4C має реакційно-спечений карбїд кремнію, вироби з якого виготовляють холодним пресуванням із наступним реакційним спіканням. Вартість таких виробів у два-три рази менша за вартість виробів із карбїду бору, є також можливість використання сировини вітчизняного виробництва.

Т а б л и ц я 1

Порівняльна характеристика керамічних матеріалів за даними [2]

Матеріал	ρ , г/см ³	$\sigma_{зг}$, МПа	H_v , ГПа	K_{1c} , МПа·м ^{1/2}
B ₄ C	2,48...2,52	200...250	29,0...31,0	2,00...3,70
SiC	3,12...3,28	326...330	22,3...22,4	3,00...5,23
Al ₂ O ₃	3,65...3,75	200...300	16,0...20,0	3,50...5,00
TiB ₂	4,51...4,55	350...398	20,8...23,0	6,69...8,00
Si ₃ N ₄	3,2...3,45	690...830	16,2...18,6	6,50...9,00

Класичний приклад композиційного бронеелемента – бронеплита, що складається з шару керамічних пластин та шарів тканини з полімерним зв'язуючим. Шари з'єднані між собою за допомогою зв'язуючого, що також входить до складу поверхневої оболонки бронеплити [3, 4].

Керамічні пластини можуть виготовлятися з композитів зі шаруватою структурою, що забезпечує підвищення їх витривалості та опору руйнуванню [5]. До складу такого композиційного матеріалу може входити один або кілька шарів, армованих неорганічними волокнами, ниткоподібними кристалами [6].

У процесі руйнування композита важливо продовжити термін цілісності кераміки, що досягається, наприклад, завдяки зміцненню зовнішнього шару керамічних пластин. Підвищити ударостійкість композиційної броні, яка має керамічну основу, можна також за рахунок нанесення на поверхню кераміки порошку металу. Це здійснюють холодним ізостатичним пресуванням із наступним вакуумним спіканням або гарячим ізостатичним пресуванням, внаслідок чого досягається близько 99% теоретичної щільності металевого покриття [7].

Після руйнування керамічного шару потік уламків керамічної пластини разом із кулею передають свою кінетичну енергію підпору з полімерного композита, в якому вона поглинається пружною та непружною складовими деформації підпору. Для підвищення міцності бронеплити до складу її тильного шару можуть додаватися тонкі металеві пластини [8, 9]. Відомі також підпори, що містять композиційний матеріал, виготовлений з поліалкенових волокон із модулем пружності щонайменше 40 ГПа і границею міцності при розтязі щонайменше 1 ГПа [10, 11], деревощаруватий пластик на синтетичному зв'язуючому [12], шари у вигляді сітки з високоміцного волокна [13], целюлозомісткий матеріал із питомою вагою 1,05...1,30 г/см³ [14] тощо.

В якості матеріалу оболонки бронеплит часто використовують просочену полімером тканину, яка покриває поверхні і бічні сторони плити, у результаті чого утворюється зовнішній шар полімерного композита [15].

Із метою підвищення кулестійкості бронеплити керамічна пластинка, яка поглинає основну частину кінетичної енергії кулі, може бути всебічно стиснута на величину від 6 до 18% руйнівного напруження матеріалу кераміки [16]. Це стиснення досягають за допомогою оболонки на основі, наприклад, поліефірної тканини (поверхнева питома вага 10...130 г/м²) та зв'язуючого, що здатне давати усадку під час затвердіння (наприклад, епокси-

фенольне), або з пружно здеформованого затверділого еластомеру, яким є синтетичний уретановий плівкоутворюючий каучук. Стискальне напруження в ньому виникає під час виготовлення бронеплит шляхом пресування їх у формі під тиском 5...10 МПа. Це в момент удару кулі перешкоджає руйнуванню кераміки під дією сил розтягу. Під час руйнування в броньованій плиті мають місце хвильові процеси у вигляді багаторазового проходження ударної хвилі крізь межі розділу кераміка – проміжний шар–підпор, що суттєво впливає на живучість захисної структури бронеелемента в цілому. За таких коливань може відбуватися порушення монолітності системи, тому доцільним є введення в конструкцію бронеелемента додаткового демпфіруючого шару [17, 18].

Відомо, що на характер деформування і руйнування матеріалів балістичного призначення великий вплив мають технологічні фактори, які можна урахувати, досліджуючи процес проникання індентора в броньові конструкції [19].

У наших дослідженнях було використано комбіновану конструкцію бронеелемента, де керамічною складовою слугував самозв'язаний карбід кремнію, а підпором – полімерний композит на основі параарамідної тканини, просоченої поліуретановим або фенолформальдегідним зв'язуючим. Такий склад структурних елементів дозволяє реалізувати броньові композиційні пластини за спрощеною технологією з використанням доступної сировини.

Результати експериментів показали, що під час балістичних випробувань характер руйнування кераміки усіх видів приблизно однаковий (рис. 1). Пластини крихко руйнуються на багато фрагментів, розміри яких коливаються в широкому діапазоні: від кількох мікронів до 10–15 мм. Спостерігаються два типа тріщин: радіальні і поперечні. Радіальні тріщини зумовлюють, головним чином, зниження границі міцності, а поперечні – виникнення виносу матеріалу. У процесі руйнування фрагменти (частинки) кераміки в разі пробою викидаються як у заперешкодний простір, так і в доперешкодний.

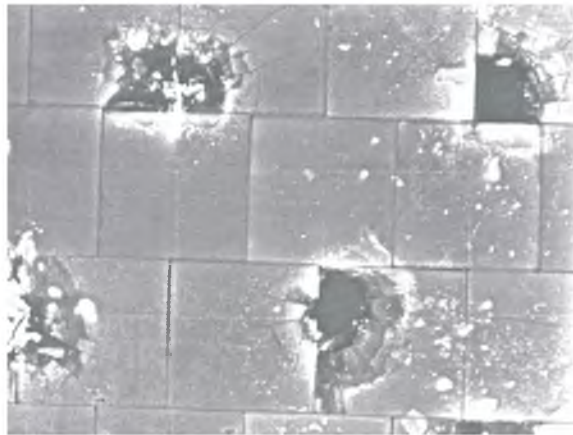


Рис. 1. Характерні руйнування в кераміці.

Дані спостережень свідчать, що основні механізми поглинання та дисипації енергії кулі пов'язані з утворенням нових поверхонь (як в кераміці, так

і в кулі) і дрібнофрагментованих частинок керамічної пластини, розгоном фрагментованої маси, передачею теплової енергії та ін. Форма розтріскування кераміки наближена до конуса. Подібні спостереження наведено в [20]: під час удару область руйнування обмежена поверхнею, що близька до конічної, з вершиною в місці контакту, а матеріал у середині конуса фрагментований. До моменту виникнення конуса в крихкому шарі, доки він зберігає свою цілісність, куля спричиняє в поверхневому шарі керамічної пластини тільки незначні деформації, а сама зазнає суттєвих змін – утворення грибоподібної форми головної частини. У момент удару кулі (індентора) на контактній поверхні керамічної пластини поширюється хвиля стиснення, взаємодія якої з радіальною хвилею розвантаження в інденторі зумовлює його потовщення поблизу контактної поверхні, а в матеріалі пластини – формування області деформації зсуву. У цій області виникають тріщини, що поширюються на поверхні фрагменту коноїда.

При випробуваннях броньової кераміки досліджуваний зразок розміщували на маятнику, по відхиленню якого розраховували поглинений імпульс. Випробовували декілька дослідних керамічних пластин із карбіду бору, карбіду кремнію та діоксиду алюмінію, що були отримані за різними технологіями (табл. 2).

Т а б л и ц я 2

Середні значення приведенного імпульсу зразків кераміки

Матеріал	$\rho_k, \text{г/см}^3$	$S_k, \text{мм}$	$I_{\text{п}}$	$I'_{\text{п}} \cdot 10^4, \text{см}^2/\text{г}$
B ₄ C (ГП)	2,5	12	0,410	1367
SiC (РС)	3,05	12	0,485	1321
Al ₂ O ₃ (ГП)	3,96	13	0,658	1278
Al ₂ O ₃ (СП)	3,4	11	0,455	1217

Примітка: ГП – гарячепресований, РС – реакційно-спечений, СП – спечений.

Як міру захисних властивостей матеріалів було взято значення питомого імпульсу з урахуванням щільності і товщини кераміки, що дозволяє оцінювати не тільки балістичну стійкість матеріалу, але й його вагові характеристики.

Питомий імпульс з урахуванням щільності і товщини кераміки оцінювали за формулою

$$I'_{\text{п}} = \frac{I_{\text{п}}}{\rho_k S_k}, \quad \text{см}^2/\text{г},$$

де $I_{\text{п}}$ – питомий імпульс (міра захисних властивостей матеріалу), що визначається як $I_{\text{пр}}/I_0$, тобто відношення імпульсу пробою $I_{\text{пр}}$ (кількості руху, поглинутого під час подолання перешкоди) до початкового імпульсу індентора I_0 ; ρ_k – щільність кераміки; S_k – товщина кераміки.

Результати випробувань (табл. 2) свідчать про найбільшу стійкість до пробою гарячепресованого карбіду бору, далі ідуть зразки, виготовлені з реакційно-спеченого карбіду кремнію, найнижчу стійкість має кераміка з Al₂O₃.

На рис. 2 показано експериментально отриману залежність питомого імпульсу від щільності керамічної пластини для реакційно-спеченого карбїду кремнію. Практика балістичних випробувань показує, що для самозв'язаного карбїду кремнію щільність $3,03 \text{ г/см}^3$ є мінімальною, за якої не погіршуються його захисні властивості (рис. 2).

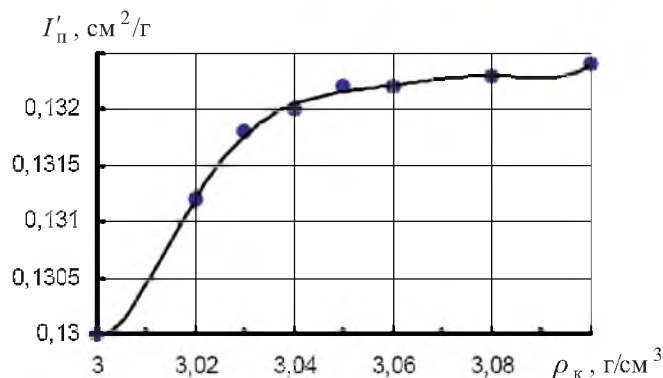


Рис. 2. Залежність питомого імпульсу від щільності керамічної пластини для реакційно-спеченого карбїду кремнію.

Балістична границя міцності конструкцій, що розглядаються, залежить, головним чином, від характеристик міцності кераміки. Навантаження, що викликає високе напруження, передається через кераміку підпору, внаслідок чого остання деформується безпосередньо під час удару. Супровідне переміщення кераміки є малим, однак завдяки високому модулю пружності кераміки в ній розвиваються великі розтяжні напруження, яким протидіють напруження на підпорі.

Оцінюючи характер руйнування матеріалів, треба відмітити, що на всіх підпорах зі сторони їх контактних поверхонь із керамічною пластинкою були сліди дії зруйнованої кераміки у вигляді плями розміром, що дорівнює чотирьом–шести діаметрам калїбрів кулі. При цьому зона тотального руйнування керамічних пластин сягає зони розміром до п'яти–семи калїбрів засобу ураження, що використовується. Від зони тотального руйнування через всю пластину проходять магістральні тріщини. Результати випробувань свідчать, що влучення кулі в непошкоджену ділянку пластини не знижує її балістичної стійкості. Проте, у випадку декількох влучень у пластину можливе некероване фрагментування її магістральними тріщинами на ділянки, розміри яких менші за критичні (чотири калїбри). У цих випадках має місце більш інтенсивне та непередбачене поле руйнування. Під час наступного влучення в такі ділянки вірогідність пробою дуже висока. Хоча і відомо багато випадків, коли цілісні пластини, що мають великі габарити, витримували багаторазові кульові удари, гарантій стійкості, окрім як для першого та з більш-меншою вірогідністю для другого удару, на наш погляд, дати неможливо.

Щоб уникнути ефекту некерованого руйнування захисного модельного блоку, було використано схему мозаїчної конструкції. Результати випробувань показали, що за такої схеми границя кожної одиничної керамічної

пластини слугувала перешкодою для розповсюдження магістральної тріщини. Таким чином, модельний блок доцільно поділяти на ділянки, розміри яких більші за критичні. Відомо, що для куль стрілецької зброї (карабін, автомат, ручний кулемет) еліпс розсіювання складає близько 50 мм. Враховуючи це, в модельному блоці нами був визначений базовий розмір типової одиничної керамічної пластини – 50×50 мм. У зразках модельних блоків також було запропоновано укласти пластини за схемою укладання цегли в будівництві з метою уникнення чотирикутних стиків.

Результати розрахунків та експериментів дозволили визначити один із варіантів конструкції підпору. Його виготовляли з полімерного композиційного матеріалу, армованого параарамідною тканиною. В якості матриці використовували полімерне зв'язуюче, яке ефективно забезпечувало передачу навантаження при деформації керамічних пластин.

Покривний шар блоку виготовляли з балістичної тканини “Kevlar” або “Tvaron”, також просоченої полімерним зв'язуючим, і укладали на зовнішній керамічний шар блока таким чином, щоб тканина щільно прилягала до поверхні кераміки, а окантовувальний шар – до торцевих поверхонь моноблоку.

Для оптимізації ширини зазорів між одиничними керамічними пластинами було змодельовано та випробувано зразки блоків із різною шириною проміжків між стиками керамічних пластин, що дозволило експериментально визначити ширину зазору, за якого балістична стійкість зразка під час улучення в зазор не погіршується.

Вогнепальні випробування розроблених зразків моноблоків, які проводилися згідно зі стандартними методиками, засвідчили, що розглянуті конструктивно-технологічні рішення можуть бути покладені в основу серійного виробництва цих виробів.

Таким чином, експериментальні дослідження підтвердили, що за показниками вартості, забезпечення вітчизняною сировиною та енергоємністю для броньової кераміки може бути рекомендований реакційно-спечений карбід кремнію, а в конструкціях бронееlementів необхідно враховувати особливості механізмів утворення і поширення тріщин в керамічних матеріалах. Результати оцінки захисних властивостей керамічних пластин за питомим імпульсом енергії індентора з урахуванням їх щільності і товщини свідчать про явні переваги кераміки з реакційно-спеченого карбїду кремнію та доцільність використання в захисних моноблоках мозаїчної конструкції.

Резюме

Представлены результаты экспериментальной оценки защитных свойств керамических пластин по приведенному импульсу энергии индентора с учетом их плотности и толщины. Показаны преимущества керамики из реакционно-спеченного карбида кремния для серийного выпуска бронееlementов. По данным модельных экспериментов установлены рациональные размеры площади керамических пластин и особенности их использования совместно с полимерным композитом на основе параарамидных тканей.

1. *Arnold S. M. and Coltman J. W.* Design trade-offs for ceramic/composite armor materials // *Adv. Mater.: Look a Head to the 21st Century 22nd (Int. Sample Techn. Conf.)*. – Boston, 1990. – P. 278 – 292.
2. *Келина И. Ю., Добринский Ю. И.* Эффективность применения нитрид-кремниевой керамики в качестве бронезащитного материала // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 1997. – № 6. – С. 9 – 12.
3. *Patent № 5705764 US, 6F41H5/04.* Система бронирования / *D. Schade, J. Drofler, M. Musante, et. al.* – Publ. 06. 01. 98.
4. *Patent № 4114809 DE, 5F41H1/02, 5/04, B32B7/02.* Материал для пуленепробиваемых плит / *G. Kellner*. – Publ. 12. 11. 92.
5. *Горик О. В., Григор'ев О. М., Островой Д. Ю., та ін.* Экспериментально-теоретичне дослідження нелінійного напружено-деформованого стану шаруватого керамічного композита // *Пробл. прочности*. – 2001. – № 6. – С. 29 – 40.
6. *Patent № 4992318 US, 5B32B5/12, C04B35/56.* Многослойный композиционный материал / *K. Gadkaree and B. Flats*. – Publ. 12. 02. 91.
7. *Patent № 4987033 US, 5B32B7/02.* Ударопрочная композиционная броня и способ ее изготовления / *S. Abkowitz, D. Rowell, H. Hearsd, and S. Kraus*. – Publ. 22. 01. 91.
8. *Patent № 251395 EP, 5F41H5/04.* Бронеплата / *E. Dunn, et al.* – Publ. 07. 01. 1988.
9. *Patent № 699887 EP, 6F41H5/04.* Многослойная броня / *H. Massariol*. – Publ. 06. 03. 96.
10. *Patent № 488465 EP, 5F41H5/04.* Многослойная бронезащитная конструкция / *P. Brock, et al.* – Publ. 03. 06. 92.
11. *Patent № 5340633 US, 5B32B3/16, 5/12, A4D15/04, A41H5/02.* Многослойная противоракетная защитная структура / *L. Van der Loo and M. Mertens*. – Publ. 23. 08. 94.
12. *Patent № 19509899 DE, 6F41H5/04.* Многослойный бронезащитный материал / *G. Kellner*. – Publ. 19. 09. 96.
13. *Patent № 91/06823 WO, 5F41H5/04.* Броня из керамики с усилением из высокопрочного волокна и защитные изделия из нее / *C. Dusan, T. Bruce, and D. Young*. – Publ. 16. 05. 91.
14. *Патент № 2133433 RU, 6F41H1/02, 5/04.* Бронезащитная преграда / *С. Хаджаева, Г. Зайцев, Э. Довгаль*. – Оpubл. 20. 07. 99, Бюл. № 20.
15. *Patent № 4911061 US, 5F41H5/02, 5/16.* Броня из композиционного материала и способ ее изготовления / *A. Pivitt, D. Rock, and S. Sridharan*. – Publ. 27. 03. 90.
16. *Патент № 2130159 RU, 6F41H1/02, 5/04.* Пулезащитная панель для средств бронезащиты / *А. Андреев, С. Осипенко, С. Славинский и др.* – Оpubл. 10. 05. 99, Бюл. № 13.
17. *Patent № 91/07633 WO, 5F41H5/04.* Броня из композиционного материала / *W. Kwok, B. Hong, D. Young, and C. Dusan*. – Publ. 30. 05. 91.

18. *Patent № 92/09861 WO, 5F41H5/04. Бронева структура из композиционного материала / W. Kwok, B. Hong, D. Young, and C. Dusan. – Publ. 11. 06. 92.*
19. *Антуков В. Н. Проникание: механические аспекты и математическое моделирование (обзор) // Пробл. прочности. – 1990. – № 2. – С. 60 – 68.*
20. *Харченко В. В., Майстренко А. Л., Бабуцкий А. И., Кондряков Е. А. Особенности деформирования и разрушения пластин из хрупких материалов при ударном нагружении // Там же. – 2002. – № 3. – С. 86 – 92.*

Поступила 30. 08. 2003