

УДК 623

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/53>**Черкашина Г.М.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Лебедєв В.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Копилов С.О.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Близнюк О.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Кривобок Р.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

СУЧАСНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО БРОНЕЗАХИСТУ

У статті показані дослідження з огляду сучасних композиційних матеріалів для виготовлення засобів індивідуального бронезахисту. Розробка ефективних засобів індивідуального бронезахисту є складним завданням через велику кількість тактико-технічних вимог, що суперечать один одному, і факторів, що впливають на бойову ефективність, а також неможливості точного передбачення характеру бойових дій. Останнім часом відзначається досить динамічний розвиток науки та техніки у цих галузях. Все більш широке застосування знаходить надвисокомодульний поліетилен та броньова кераміка, оптимізуються структури на основі арамідних тканин, розвиваються методи розрахунку та синтезу структур, уточнюються вимоги до рівнів та площ захисту – засоби індивідуального бронезахисту. Для виготовлення матеріалів бронезилетів, призначених для одноразового утримання високошвидкісного високоенергетичного удару різної інтенсивності використовують різні типи композиційних матеріалів. Для виготовлення конструкцій, призначених для одноразового утримання високошвидкісного удару використовуються органо– та склопластики на основі «крихких» полімерних матриць з високою енергією руйнування. Показано, що при розробці полімерних композиційних броньових матеріалів, ефективних як захисних від високошвидкісних інденторних впливів, аналіз властивостей полімерних композиційних матеріалів з полімерними волокнами, у тому числі безперервними, і тканинами з них в якості наповнювачів. Виходячи з аналізу світових тенденцій у галузі створення високоефективної комбінованої броні на основі неметалічних матеріалів, необхідно створити нову полегшену комбіновану броню, що складається з керамічної основи, арамідної підкладки із заданою орієнтацією армуючих ниток та полімерної матриці з низькою температурою затвердіння. Розробка нових матеріалів із меншою вартістю виготовлення дозволить за рівних витрат збільшити захисні властивості бронееlementів.

Ключові слова: засоби індивідуального броньованого захисту, бронезилет, броньові матеріали, полімерні композити, кераміка.

Постановка проблеми. В даний час в нашій країні і за кордоном виробляється велика номенклатура засобів індивідуального бронезахисту різного конструкторсько-технологічного та ергономічного виконання, орієнтованого на широкий спектр областей можливого застосування.

Максимальна ефективність засобів індивідуального бронезахисту проявляється при виконанні бойових завдань, не пов'язаних із тривалими активними пересуваннями: несення варті, марші на техніці, короткочасні штурмові акції,

тому застосування грудних і спинних бронепанелей виправдане тільки при малорухливих діях бійця у вертикальному положенні. При тривалих маршах, веденні бойових дій у гірських умовах, розвідці та інших видах бойової діяльності, що потребують граничної напруги сил, носіння протипульних бронепанелей недоцільне.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел [1, с. 307; 2, с. 24] показав, що під поняттям «засіб індивідуального бронезахисту» в цілому розуміється його здат-

ність захищати різні частини тіла людини від впливу вогнепальної, холодної, ріжучої, колючої зброї, ударної та ударно-дробної дії, а також забезпечення виключення або мінімізації заброньованої локальної контузійної травми та механічних ушкоджень [3, с. 4567]. У дослідженні А. Е. Джассема, А. Д. Джавада, А. О. Самармада, А. Ф. Хамза [4, с. 550] запропоновано альтернативні матеріали для розробки броні, що складається з модифікованої гуми та ебоніту, а також керамічних частин на основі оксиду алюмінію шестикутної структури, кевлару та вуглецю та сучасні технології згущувальних рідин. В статті [5, с. 133] Бобрової С. Ю. та Галавської Л. Є. описана розробка балістичних трикотажних полотен для виготовлення засобів бронезахисту. Також була розроблена та досліджена еластомерно-сталева ламінована броня [6, с. 259].

Метою статті є дослідження сучасних композиційних матеріалів для виготовлення засобів індивідуального бронезахисту.

Завдання статті:

- визначити вимоги та характеристики сучасних бронезилетів;
- проаналізувати особливості складу композиційних матеріалів для виготовлення засобів індивідуального бронезахисту.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Усі сучасні бронезилети відповідно до стандарту НАТО STANAG 4569 за рівнями захисту діляться на шість класів. Сьогодні 2-й клас гарантує захист від усіх пістолетних куль, включаючи ТТ та ПСМ. Щоб забезпечити цей рівень захисту, розробник має в розпорядженні не так багато броньових матеріалів і вже відпрацьованих захисних структур із комбінації цих матеріалів. Так, захисна структура із сталевим бронеелементом матиме товщину 2,5–3,0 мм, масу 1 дм² – 187 г, з поліетиленовим жорстким бронеелементом – товщину 11 мм, масу 1 дм² – 104 г.

Важливою характеристикою бронезилета є не тільки маса, що впливає на сумарну бойову ефективність, але і зручність застосування. Носіння бронезилетів ускладнює теплообмін і в спекотному кліматі може призвести до перегріву бійця та втрати боєздатності. Поява нових типів ефективних броньових боєприпасів висунула перед розробниками легкоброньованої та неброньованої техніки актуальне завдання – підвищення її захищеності, а також захищеності людей, які перебувають у ній. Броньовий захист як у військовій галузі, так і в цивільній галузі розвивається в напрямку одержання та використання матеріалів

з високими захисними властивостями та нижчою, ніж у традиційно використовуваної металевій броні, густиною [1, с. 307; 2, с. 24]

Перспективним шляхом вирішення проблеми підвищення стійкості та зниження маси броньового захисту, поряд із традиційними методами, стала розробка комбінованої броні з керамічним лицьовим шаром та підкладкою з композиту або металу, що має підвищену стійкість до дії броньових куль. Така структура броні дозволяє у 2-3 рази знизити масу виробу з неї порівняно з масою виробу із рівностійкої сталевій броні високої твердості.

Виходячи з аналізу світових тенденцій у галузі створення вискоєфективної комбінованої броні на основі неметалічних матеріалів, необхідно створити нову полегшену комбіновану броню, що складається з керамічної основи, арамідної підкладки із заданою орієнтацією армуючих ниток та полімерної матриці з низькою температурою затвердіння.

Для виготовлення матеріалів бронезилетів, призначених для одноразового утримання високошвидкісного високоенергетичного удару різної інтенсивності використовують:

1) тканини різної текстури на основі волокон з ароматичних поліамідів (Kevlar, Twaron та ін.), надвисокомолекулярного поліетилену (НВМПЕ) (Spectra, Dyneema та ін.) – полімерна текстильна (ткана) броня;

2) органо- і склотекстоліти на основі тканин з волокон Kevlar, скляних та їх сумішей з полімерними та термореактивних (олігоакрилати, олігоmaleїнати, епоксидні), термопластичних (блоксополімерні, іономірні), еластомерних навантажень – полімерна композиційна броня;

3) супергібридні полімер-металеві та полімер-керамічні міжшарові композиційні матеріали – комбінована броня;

4) нанополімерні матеріали на основі полімерних гелів та електроактивні полімери.

У полімерних текстильних броньових матеріалах, що забезпечують захист від високошвидкісного інденторного впливу (м'яка броня) використовують багатошарові пакети з тканин (і повстяних) з певним плетінням волокон (текстура). Найбільш ефективними є тканини з волокон зі специфічною фібрилярною структурою, що утворюється на стадії витяжки з розчинів, розплавів, гелів, волокнуотворюючих полімерів при оптимальному ступені витяжки. Найбільше застосування як компонент матеріалів «м'якої» броні отримали волокна з ароматичних поліамідів Kevlar (DuPont, США), Twaron (Enka, Нідерланди) і волокна з НВМПЕ Spectra (Allied Fibers, США), DYNEEMA (DSM, Нідерланди).

Для багатьох полімерів в орієнтованому стані характерна фібрилярна структура з чергуванням аморфних і кристалічних ділянок з періодичністю порядку одиниць-десятків нм. При витягуванні багатьох видів волокон спостерігається зміна характеру залежності властивостей волокна від кратності витягування, що пов'язано зі зміною механізму орієнтації, розворотом кристалітів, перебудовою аморфних областей, формуванням фібрилярних структур.

Утримання високошвидкісного удару полімерними волокнами з фібрилярною структурою забезпечується комплексним механізмом гальмування зростання тріщин:

1) створення бар'єрів на шляху тріщин – фібрилярне розщеплення волокон на площині з мінімальною поверхневою енергією; участю міжфібрилярної взаємодії у перерозподілі механічних напруг між структурними елементами волокна та міжфазною областю; розгалуженням тріщин переважно в аксіальному напрямку, внаслідок чого поверхня руйнування волокон у сотні разів перевищує площу їх поперечного перерізу; участю міжфазної області у перерозподілі та релаксації напруг;

2) затупленням вершини тріщини внаслідок багатостадійного перебігу релаксаційних процесів; демпфуванням і релаксацією напруг при створенні зростаючої тріщини: поверхнею через низький ЕІ волокон;

3) низькою чутливістю волокон до концентраторів напруги;

4) сильною фібриляцією з відщепленням мікрофібрил з поверхні волокон зі збільшенням деформації, накопиченням дефектів.

Дослідження, проведені на зразках «м'якої» (тканинної) броні з тканин ТСВМ (арт. ДЖ-56319) саржевого переплетення, тканини з волокон Twaron (фірма Akzo Nobel), тканини Twaros (полотно з ниток Twaron 93 текс), виготовлених на основі волокон підшліхтованих, відмитих та гідрофобізованих, показали складність та багатфакторність стійкості «м'якої» броні, яка підвищується при збільшенні енергоємності тканинного матеріалу (його міцності та деформованості). Стійкість броні визначає комплекс властивостей (деформований обсяг, його форма, поля навантажень-деформацій, коефіцієнти зовнішнього тертя, кількість адсорбованої вологи, частота та амплітуда коливань динамічного «завантаження», швидкості поширення оборотної та незворотної деформацій) і особливо текстуру тканини. Так, викривленість ниток у тканині Twaros полотняного плетіння в порівнянні з тканиною ТСВМ

(саржа) з урахуванням зазору між нитками, що залежить від ступеня натягу в 1,25 рази вище.

Важливою властивістю арамідних ниток (як багатьох інших волокнистих конструкцій) є дискретність їх структури. Кожна нитка складається з багатьох моноволокон (філаментів). Дискретність структури визначає високу стійкість ниток до згинальних напруг.

Полімерна броня з непросочених полімерними сполучними тканин з певним плетінням волокон застосовується як захист від високошвидкісних ударних навантажень конструкцій гелікоптерів, літаків, ВМД (захист конструкцій при руйнуванні розділових кілець турбінних лопаток). Так, кільцевий екран товщиною 38 мм, сформований з 75–100 шарів тканин з поліарамідних волокон, затримує уламки зруйнованого колеса з частотою обертання 6000 об/хв з ванадій-нікель-хромового сплаву.

До переваг текстильної броні при порівнянні її з іншими захисними структурами 1–2 класу захисту слід віднести меншу вагу і більший комфорт при експлуатації виробу. Товщина тканих бронепакетів різних фірм-виробників коливається від 6–7 мм для 1 класу захисту до 18–20 мм. – для 2-го. У складі захисних структур можуть застосовуватися демпфери різних конструкцій зменшення травмування організму людини.

При розробці полімерних композиційних броньових матеріалів, ефективних як захисних від високошвидкісних інденторних впливів, аналіз властивостей полімерних композиційних матеріалів з полімерними волокнами, у тому числі безперервними, і тканинами з них в якості наповнювачей (волокнисті полімерні композиційні матеріали (ВПКМ), органоволокніти та органотекстоліти на основі термореактивних), органопластики, органіти), що характеризують їх поведінку при статичних та динамічних навантаженнях зі швидкістю деформування при ударі $e^* = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (руйнівна напруга, тріщиностійкість, коефіцієнти концентрації напруг, енергоємність руйнування при ударі та ін.), є лише першим кроком до оптимізації складу та структури матеріалів з необхідною динамічною працездатністю при $e^* = 10^2\text{--}10^4 \text{ с}^{-1}$.

Використання ВПКМ різного складу та структури як броньові матеріали має ряд особливостей. Пенетрації високошвидкісного індентора в багатошарові пакети з тканин травмують волокна, які деформуються з розтягуванням і стиском і поглинають енергію удару при руйнуванні.

Для виготовлення конструкцій, призначених для одноразового утримання високошвидкісного удару використовуються органо– та склопластики

на основі «крихких» полімерних матриць з високою енергією руйнування. При високошвидкісному ударному впливі накопичення дефектів у ВПКМ спочатку йде окремо у матриці та волокнах (у матриці та скляних волокнах – хаотична система тріщин, у полімерних волокнах накопичуються аксіальні тріщини з локальним обривом фібрил).

Руйнування полімерних волокон (Kevlar, НВМПЕ) при розтягуванні проходить по міжфібрилярному механізму з вируванням ділянок мікрофібрил. При збільшенні деформації відбувається сильна фібриляція з відщипуванням мікрофібрил із поверхні волокон.

Опишемо особливості комбінованих (супергібридних) полімер-металевих та полімер-керамічних броньових матеріалів та конструкцій. Полімерні текстильні та композиційні матеріали не ефективні для захисту від високошвидкісних (1000–1100 м/с) куль і осколків та низькошвидкісних куль особливої конструкції, що розсувають нитки в тканинах, що пролітають між нитками, не руйнуючи їх. У цих випадках захист від високошвидкісних ударних впливів, запобігання penetрації захисних матеріалів здійснюється використанням багатошарових комбінованих (супергібридних) захисних конструкцій (полімер-металева, полімер-керамічна броня). Комбінована броня заснована на використанні різних поєднань різних типів броні, наприклад, шарів з тканин і металевих або керамічних бронееlementів, шарів з органопластиків з волокнами або тканинами з волокон ароматичних поліамідів, НВМПЕ з бронееlementами з металів або кераміки, пластиків.

Особливості поглинання енергії високошвидкісного удару різними матеріалами дозволяють розділити захисну конструкцію на функціональні шари, що виконують специфічні завдання:

1) гальмування високошвидкісних інденторів, деформація (розплющування) головної частини бронейного індентора, його руйнування у шарах з високою в'язкістю руйнування, високим рівнем поглинання енергії високошвидкісного удару (тверді бронейлети, пластини, шари з металів, керамік, ВПК);

2) зупинка індентора (залишків кулі, уламків) у шарах, сформованих з полімерних волокон (тканинних пакетах). Жорсткі шари з ВПКМ дозволяють реалізувати високу міцність при стисканні керамічних елементів, наклеєних на їхню поверхню, а висока міцність органо– і склопластиків істотно знизити енергію індентора. Низька щільність полімерних шарів дозволяє оптимізувати масу всієї багатошарової захисної конструкції.

Принцип проектування комбінованої броні полягає в забезпеченні зниження впливу індентора до такого рівня, при якому після penetрації індентором частини захисної конструкції, його залишкова енергія вже недостатня для penetрації шарів захисної конструкції, що залишилися. У бронейлетах 5 та 6 класів захисту використовуються, як мінімум, два типи матеріалів (тканини з поліарамідних або НВМПЕ – волокон та бронееlementи з кераміки, сталі, титану, алюмінію). Маса м² броні зі сталевими елементами становить 50–60 кг, з керамічними (дорожче вдвічі) – 45–50 кг.

Порівняльні характеристики щодо протипульної стійкості НВМПЕ та кераміки з традиційною металевою бронєю – сталеву, титанову та алюмінієву представлені в таблиці 1 [2, с. 24].

Видно, що поліетиленова броня, яка використовується у 2-му та 3-му класах захисту, в 5 разів товща за сталеву. Керамічна броня, що використовується в 5-му класі захисту, також мінімум у 2 рази товща за сталеву. Та й живучість такої броні, тобто здатність витримати кілька пострілів, помітно гірша, ніж у металевого аналога. Значна товщина захисної структури із нових матеріалів створює колосальні проблеми конструкторам бронейлетів. Розробити виріб прихованого носіння стає практично неможливо, навіть використовуючи пресовані поліетиленові панелі завтовшки 10–11 мм. Відомо, що бронейпанелям із поліетилену можна надати практично будь-яку форму, але ця якість не компенсує проблеми великої товщини. Цей недолік ще більш виражений у бронейлетах 3-го класу, де необхідно використовувати панель завтовшки вже 21–22 мм. Такі бронейпанелі важко компонується у бронейлетах навіть відкритого носіння.

Висновки. Показано, що при розробці полімерних композиційних броньових матеріалів, ефективних як захисних від високошвидкісних інденторних впливів, аналіз властивостей полімерних композиційних матеріалів з полімерними волокнами, у тому числі безперервними, і тканинами з них в якості наповнювачів. Виходячи з аналізу світових тенденцій у галузі створення високоефективної комбінованої броні на основі неметалічних матеріалів, необхідно створити нову полегшену комбіновану броню, що складається з керамічної основи, арамідної підкладки із заданою орієнтацією армуючих ниток та полімерної матриці з низькою температурою затвердіння. Розробка нових матеріалів із меншою вартістю виготовлення дозволить за рівних витрат збільшити захисні властивості бронееlementів.

Порівняльні характеристики захисту, виконаного з різних броньових матеріалів

Матеріал	Рівень захисту за STANAG 4569				
	1	2	3	5	6a
Броньова сталь	135/1,7*	187/2,4	343/4,4	500/6,4	860/11,0
Титан	135/3,0	155/3,5	310/7,0	445/10,0	-
Алюміній	135/5,0	190/7,0	590/22,0	860/32,0	1160/43,0
НВМПЕ	40/4,0	104/11,0	210/22,0	-	-
Арамідні тканини	35/4	100/-			
Кераміка на основі корунду (Al ₂ O ₃) на підложці з поліетилену	-	-	-	360-400/17	420-460/19
Кераміка на основі карбиду бору (B ₄ C) на підложці із НВМПЕ	-	-	-	260-290/16	340-360/20

* Поверхнева густина (г/дм³)/товщина захисної структури (мм).

Список літератури:

1. Guleria T., Verma N., Zafar S., Jain V. Fabrication of Kevlar®-reinforced ultra-high molecular weight polyethylene composite through microwave-assisted compression molding for body armor applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2021. Vol. 40(7–8). P. 307.
2. Pach J., Pyka D., Jamroziak K., Mayer P. The experimental and numerical analysis of the ballistic resistance of polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 2017. Vol. 113. P. 24.
3. Monteiro S.N., Louro L.H.L., Trindade W. Natural curaua fiber-reinforced composites in multilayered ballistic armor. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2015. Vol. 46(10). P. 4567.
4. Джассем А. Е., Джавад А. Д., Самармад А. О., Хамза А. Ф. Чисельні та експериментальні дослідження багатошарової броні для персонального захисту. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2022. Т. 23. № 3. С. 550-558.
5. Боброва С. Ю., Галавська Л. Є. Розробка балістичних трикотажних полотен для виготовлення засобів бронезахисту. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну: Серія «Технічні науки»*. 2015. № 3 (86). С. 133-140.
6. Wang Y., Chen X., Young R., Kinloch I., Wells G. Elastomer–steel laminate armor. *Composites Part B: Engineering*. 2015. Vol. 68, P. 259.

Cherkashina G.M., Lebedev V.V., Kapilov S.O., Bliznyuk O.V., Kryvobok R.V.
MODERN COMPOSITE MATERIALS FOR THE MANUFACTURE OF INDIVIDUAL ARMOR PROTECTION

The article shows research on the overview of modern composite materials for the manufacture of individual armor protection. The development of effective means of individual armor protection is a difficult task due to a large number of conflicting tactical and technical requirements and factors affecting combat effectiveness, as well as the impossibility of accurately predicting the nature of combat operations. Recently, quite dynamic development of science and technology in these fields has been noted. Ultra-high-modulus polyethylene and armor ceramics are increasingly being used, structures based on aramid fabrics are being optimized, methods of calculating and synthesizing structures are being developed, requirements for levels and areas of protection – means of individual armor protection – are being clarified. Various types of composite materials are used for the production of body armor materials intended for one-time containment of a high-speed, high-energy impact of various intensities. Organoplastics and fiberglass based on "brittle" polymer matrices with high fracture energy are used for the manufacture of structures intended for one-time containment of a high-speed impact. It is shown that in the development of polymer composite armor materials effective as protective against high-speed indenter impacts, the analysis of the properties of polymer composite materials with polymer fibers, including continuous ones, and fabrics from them as fillers. Based on the analysis of global trends in the field of creating high-performance combined armor based on non-metallic materials, it is necessary to create a new lightweight combined armor consisting of a ceramic base, an aramid substrate with a given orientation of reinforcing threads, and a polymer matrix with a low solidification temperature. The development of new materials with a lower production cost will increase the protective properties of armor elements at the same cost.

Key words: means of individual armored protection, body armor, armor materials, polymer composites, ceramics.