

*С.С. ДОБРОТВОРСЬКИЙ, Д.В. ТРУБІН, Є.В. БАСОВА, Б.О. АЛЕКСЕНКО, Л.Г. ДОБРОВОЛЬСЬКА*

## **АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ВДОСКОНАЛЕННЯ БРОНЕЗАХИСТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ: ОГЛЯДОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ**

В роботі розглянуті питання сучасного напрямку сталого розвитку безпеки України у сфері її обороноздатності. Об'єктом дослідження є засіб персонального бронювання типу бронезелет, а предметом роботи є дослідження процесів руйнування цілості засіб персонального бронювання типу бронезелет із метою пошуку шляхів покращення їх міцностних характеристик. Захисні бронезелети – це ключовий елемент захисту військових, правоохоронних органів та інших професій, пов'язаних з ризиком для життя. Сучасні матеріали та технології дозволяють виготовляти бронезелети найвищого рівня захисту, забезпечуючи не тільки захист від куль, але й від інших небезпек, таких як вибухи та осколки. Однак, системи повинні мати покращену балістичну ефективність, бути легкими, гнучкими та комфортними для ефективної роботи працівників. Загалом, ефективність захисного бронезелета зумовлена різними факторами, включаючи техніку конструювання бронезелета, тип матеріалів та обробку захисних панелей.

В роботі наведено докладний огляд сучасного стану техніки конструювання панелей бронезелетів та різних матеріалів для виготовлення захисних пластин. Наведений докладний аналіз різних видів захисних бронезелетів та їх категорій. Далі будуть наведені різні методи конструювання панелей, їх проблеми та можливі рішення. На закінчення, будуть обговорені різні полімерні волокнисті та майбутні можливі продвинуті матеріали, включаючи вуглецеві нанотрубки (CNT), графен CNT та рідини з підвищеним згущенням (STF), для розробки панелей підсиленого захисту.

**Ключові слова:** ступінь захисту, бронезелет, руйнівна властивість, метод скінчених елементів.

The paper deals with the issues of the current direction of sustainable development of Ukraine's security in the field of its defence capability. The object of the study is personal protective equipment such as body armour, and the subject of the work is the study of the processes of destruction of the integrity of personal protective equipment such as body armour in order to find ways to improve their strength characteristics. Protective body armour is a key element of protection for the military, law enforcement agencies and other professions involving risk to life. Modern materials and technologies make it possible to produce bulletproof vests of the highest level of protection, providing not only protection against bullets but also against other hazards such as explosions and shrapnel. However, the systems must have improved ballistic efficiency, be lightweight, flexible and comfortable for effective work. In general, the effectiveness of protective body armour is determined by various factors, including the construction technique of the vest, the type of materials and the finish of the protective panels.

This paper provides a detailed overview of the current state of the art in body armour panel design and various materials for the manufacture of protective plates. A detailed analysis of the different types of protective body armour and their categories is provided. Next, various methods of panel construction, their problems and possible solutions will be presented. Finally, various polymeric fibre and future possible advanced materials, including carbon nanotubes (CNTs), graphene CNTs and super thickened fluids (STFs), will be discussed for the development of enhanced protection panels.

**Keywords:** degree of protection, body armour, destructive property, finite element method.

**Вступ.** Носіння, так званого персонального бронювання, є загальною практикою для працівників правоохоронних органів, військових, а також цивільних професій, таких як журналісти та охоронці безпеки, щоб захистити себе від куль, осколків, ножів та інших загроз [1]. Багато правоохоронних агенцій зобов'язують своїх службовців носити балістичні захисні жилети під час служби, але багато з таких працівників не відчувають комфорту під час служби в такому бронезелеті. Це зумовлено тим, що більшість розроблених жилетів виготовлені з важких та жорстких матеріалів, щоб забезпечити кращий балістичний захист від вищих рівнів загроз (NIJ Level III та IV). Носіння важкого та негнучкого бронезелета тривалий період обмежує рухливість і може викликати перегрів [2-3].

За останні десятиліття для розробки систем бронезелетів використовувалися різноманітні матеріали, від войлоку до металу, від тканин до композитів, наноматеріалів та біоінспірованих матеріалів у біоміметичних умовах. На сьогоднішній день різні науковці та розробники бронезелетів працюють над новими та інноваційними різними балістичними волокнами, балістичними тканинами, параметрами панелей та техніками проектування бронезелетів, не лише для покращення загальної продуктивності, а й для виконання вимог сучасної

військової операції, тактики війни, що базується на технології та поточних терористичних загрозах [4-6].

Більшість досліджень у цій області фінансуються приватними компаніями, які прагнуть покращити ринкову привабливість своїх продуктів, або захищені патентами розвідувальних органів чи окремих осіб. Це робить результати таких досліджень недоступними та секретними для ширшої аудиторії, яка працює та займається дослідженнями у даній галузі. Тому дуже складно знайти поточну ситуацію та конкретні прогалини у цій галузі для подальшого аналізу, дослідження та покращення.

Загалом, у роботі будуть розглянуті різні типи бронезелетів та їх характеристики щодо захисту від кульової стріли. Також будуть вказані потенційні матеріали для розвитку бронезелетів у майбутньому. Крім того, будуть описані різні матеріали та техніки проектування для розробки бронезелетів.

Аналіз основних досягнень та літератури.

Стандарти рівнів захисту бронезелетів.

Існує кілька стандартів рівнів захисту бронезелетів, що визначаються залежно від рівня захисту, який забезпечується захисним елементом. Основні стандарти, що використовуються у світі, включають:

- NIJ (National Institute of Justice) - стандарт США, який визначає 6 рівнів захисту від NIJ Level I до NIJ Level IV.
- НАТО (North Atlantic Treaty Organization) - визначає рівні захисту бронежилетів за стандартом STANAG (Standardization Agreement), де встановлено 5 рівнів захисту від 1 до 4 та рівень спеціального захисту.
- EN (European Norm) - стандарт Європейського Союзу, який визначає 7 рівнів захисту від EN Level B1 до EN Level B7.

Крім цих стандартів, кожна країна може встановлювати свої власні стандарти, що відповідають її потребам та умовам використання бронежилетів. В Україні існує стандарт ДСТУ 8782:2018, що передбачає 6 класів захисту бронежилетів від куль, а також 3 спеціальних класу захисту. У будь-якому випадку, вибір бронежилета повинен залежати від конкретного завдання та умов, в яких він буде використовуватися.

#### *NIJ Standard-0101.06 [7]*

National Institute of Justice (NIJ) Standard-0101.06 – це стандарт, який встановлює рівні захисту для бронепластин, які використовуються правоохоронними органами та військовими. Він класифікує бронепластини за рівнем захисту, починаючи від NIJ Level IIA (захист від 9 мм FMJ RN та .40 S&W FMJ) до NIJ Level IV (захист від 7.62 мм AP).

Стандарт встановлює 5 рівнів захисту – IIA, II, IIIA, III, IV за рівнем балістичних характеристик. Крім того, визначено спеціальний тестовий клас, який дозволяє перевірити броню на загрози, які можуть не охоплюватися п'ятьма стандартними класами.

Кожен рівень захисту відповідає конкретному рівню захисту від куль та вимогам щодо маси та товщини бронепластини. Рівень захисту зазвичай визначається шляхом випробувань бронепластини згідно з встановленими стандартами.

Для кожного рівня захисту встановлюються різні умови в залежності від стану бронепластини: новий (unworn) чи зношений (conditioned)

#### Тип IIA (9 мм; .40 S&W)

Нова (незношена) бронепластина типу IIA здатна зупинити кулю калібру 9 мм з повною металеву оболонкою з круглою носовою частиною (FMJ RN) із заданою масою 8,0 г і швидкістю 373 м/с  $\pm$  9,1 м/с (1225 футів/с  $\pm$  30 футів/с) і кулю .40 S&W з повною металеву оболонкою (FMJ) із заданою масою 11,7 г (180 г) і швидкістю 352 м/с  $\pm$  9,1 м/с (1155 футів/с)  $\pm$  30 футів/с).

Якщо бронепластина вже була в процесі експлуатації, то необхідні показники дещо змінюються. Броня типу IIA має бути випробувана кулями калібру 9 мм FMJ RN із заданою масою 8,0 г і швидкістю 355 м/с  $\pm$  9,1 м/с (1165 футів/с  $\pm$  30 футів/с.) і з кулями калібру .40 S&W FMJ із заданою масою 11,7 г (180 г) і швидкістю 325 м/с  $\pm$  9,1 м/с (1065 футів/с  $\pm$  30 футів/с).

#### Тип II (9 мм; .357 Magnum)

Нова броня типу II повинна бути випробувана кулями калібру 9 мм FMJ RN із зазначеною масою 8,0 г і швидкістю 398 м/с  $\pm$  9,1 м/с (1305 футів/с  $\pm$  30 футів/с) і кулями .357 Magnum Jacketed Soft Point (JSP) із заданою масою 10,2 г і швидкістю 436 м/с  $\pm$  9,1 м/с (1430 футів/с  $\pm$  30 футів/с).

Зношену броню типу II необхідно перевірити кулями калібру 9 мм FMJ RN із заданою масою 8,0 г і швидкістю 379 м/с  $\pm$  9,1 м/с (1245 футів/с  $\pm$  30 футів/с.) і кулями калібру .357 Magnum JSP із заданою масою 10,2 г і швидкістю 408 м/с  $\pm$  9,1 м/с (1340 футів/с  $\pm$  30 футів/с).

#### Тип IIIA (.357 SIG; .44 Magnum)

Нова броня типу IIIA повинна бути випробувана кулями .357 SIG FMJ Flat Nose (FN) із зазначеною масою 8,1 г і швидкістю 448 м/с  $\pm$  9,1 м/с (1470 футів/с  $\pm$  30 футів/с) і кулями калібру .44 Magnum Semi Jacketed Hollow Point (SJHP) із зазначеною масою 15,6 г і швидкістю 436 м/с  $\pm$  9,1 м/с (1430 футів/с  $\pm$  30 футів/с).

Зношену броню типу IIIA необхідно перевірити кулями калібру .357 SIG FMJ FN із заданою масою 8,1 г і швидкістю 430 м/с  $\pm$  9,1 м/с (1410 футів/с  $\pm$  30 футів/с) і кулями калібру .44 Magnum SJHP із заданою масою 15,6 г і швидкістю 408 м/с  $\pm$  9,1 м/с (1340 футів/с  $\pm$  30 футів/с).

#### Тип III (гвинтівки)

Тверду броню або вставні плити типу III необхідно випробувати в зношеному стані кулями зі сталеву оболонкою калібру 7,62 мм FMJ (військове позначення США M80) із заданою масою 9,6 г і швидкістю 847 м/с  $\pm$  9,1 м/с (2780 футів/с  $\pm$  30 футів/с).

Гнучку броню типу III необхідно випробувати як у новому, так і у зношеному стані кулями зі сталеву оболонкою калібру 7,62 мм FMJ (військове позначення США M80) із заданою масою 9,6 г і швидкістю 847 м/с  $\pm$  9,1 м/с (2780 футів/с  $\pm$  30 футів/с).

#### Тип IV (бронебійна гвинтівка)

Тверду броню або вставні плити типу IV необхідно випробувати в зношеному стані бронебійними (AP) кулями калібру .30 (військове позначення США M2 AP) із заданою масою 10,8 г і швидкістю 878 м/с  $\pm$  9,1 м/с (2880 футів/с  $\pm$  30 футів/с).

Гнучку броню типу IV необхідно випробувати як у новому, так і у зношеному стані кулями 30 калібру AP (військове позначення США M2 AP) із заданою масою 10,8 г (166 г) і швидкістю 878 м/с  $\pm$  9,1 м/с (2880 футів/с  $\pm$  30 футів/с).

#### Спеціальний тип

Споживач, який має спеціальні вимоги до рівня захисту, відмінного від одного з вищезазначених стандартних типів і рівнів загрози, повинен вказати точний метод тестування та контрольні вимірювальні швидкості, які будуть використовуватися, і вказати, що цей стандарт повинен регулювати всі інші аспекти. Стандарт надає рекомендації щодо загальних загроз

спеціального типу та відповідних швидкостей куль. стандартом NIJ Standard-0101.06 наведена нижче  
Підсумкова таблиця зі списком типів захисту за (табл. 1).

Таблиця 1 – Відповідність рівнів захисту та куль, від яких вони захищають

Рівень броні	Захист
Тип ІА	Нова броня: 8 г 9×19 мм Parabellum Full Metal Jacketed Round Nose (FMJ RN) зі швидкістю 373 м/с ± 9,1 м/с (1225 футів/с ± 30 футів/с) 11,7 г 40 S&W Full Metal Jacketed (FMJ) зі швидкістю 352 м/с ± 9,1 м/с (1155 футів/с ± 30 футів/с) 14,9 г .45 ACP Full Metal Jacketed (FMJ) зі швидкістю 275 м/с ± 9,1 м/с (900 футів/с ± 30 футів/с).
	Зношена броня 8 г 9 мм FMJ RN зі швидкістю 355 м/с ± 9,1 м/с (1165 футів/с ± 30 футів/с) 11,7 г .40 S&W FMJ зі швидкістю 325 м/с ± 9,1 м/с (1065 футів/с ± 30 футів/с) 14,9 г .45 ACP Full Metal Jacketed (FMJ) зі швидкістю 259 м/с ± 9,1 м/с (850 футів/с ± 30 футів/с).
Тип ІІ	Нова броня 8 г 9 мм FMJ RN зі швидкістю 398 м/с ± 9,1 м/с (1305 футів/с ± 30 футів/с) 10,2 г .357 Magnum Jacketed Soft Point зі швидкістю 436 м/с ± 9,1 м/с (1430 футів/с ± 30 футів/с).
	Зношена броня 8 г 9 мм FMJ RN зі швидкістю 379 м/с ± 9,1 м/с (1245 футів/с ± 30 футів/с) 10,2 г .357 Magnum Jacketed Soft Point зі швидкістю 408 м/с ± 9,1 м/с (1340 футів/с ± 30 футів/с).
Тип ІІА	Нова броня 8,1 г .357 SIG FMJ Flat Nose (FN) зі швидкістю 448 м/с ± 9,1 м/с (1470 футів/с ± 30 футів/с) 15,6 г .44 Magnum Semi Jacketed Hollow Point (SJHP) зі швидкістю 436 м/с (1430 футів/с ± 30 футів/с)
	Зношена броня 8,1 г .357 SIG FMJ Flat Nose (FN) зі швидкістю 430 м/с ± 9,1 м/с (1410 фут/с ± 30 фут/с) 15,6 г .44 Magnum Semi Jacketed Hollow Point (SJHP) зі швидкістю 408 м/с ± 9,1 м/с (1340 футів/с ± 30 футів/с).
Тип ІІІ	Зношена броня 9,6 г (148 г) 7,62 × 51 мм NATO M80 зі швидкістю 847 м/с ± 9,1 м/с (2780 футів/с ± 30 футів/с).
Тип ІV	Зношена броня 10,8 г (166 г) .30-06 Springfield M2 бронебійні (AP) зі швидкістю 878 м/с ± 9,1 м/с (2880 фут/с ± 30 фут/с).

#### STANAG-2920 [ 8, 9, 10 ]

STANAG-2920 – це стандарт, який розробляється НАТО для оцінки здатності бронепластини захищати від вибухових фрагментів, які виникають під час вибуху міни, гранати або іншого вибухового пристрою.

Стандарт включає чотири рівні захисту (від 1 до 4), кожен з яких вимагає відповідних параметрів і випробувань, щоб забезпечити високий рівень захисту. На відміну від стандартів, що використовуються для оцінки балістичного захисту, STANAG-2920 не вимагає випробування з кулями, а замість цього використовує фрагментуючий вибуховий заряд для моделювання вибухового удару.

Кожен рівень захисту відповідає певному рівню здатності бронепластини захистити людину від фрагментів при вибуху. Рівень 1 забезпечує базовий рівень захисту, а рівень 4 - максимальний захист. Більш високий рівень захисту означає, що бронепластина може здатися з більшими швидкостями вибухових фрагментів та з більшою енергією.

STANAG-2920 є міжнародним стандартом, що використовується НАТО та іншими організаціями для оцінки захисту від вибухових фрагментів. Цей стандарт включає в себе вимоги до якості та

випробувань бронепластин, які повинні відповідати певним стандартам та показникам захисту.

Важливо зазначити, що STANAG-2920 не оцінює здатність бронепластини захистити від куль, як це роблять стандарти, такі як NIJ Standard-010

*ДСТУ 8782:2018* [11]

Стандарт ДСТУ 8782:2018 “Засоби індивідуального захисту. Бронежилети. Класифікація. Загальні технічні умови” передбачає встановлення загальних вимог до бронежилетів, що використовуються військовослужбовцями, з метою захисту від патронів та інших небезпечних факторів.

Стандарт містить вимоги до матеріалів, конструкції, розмірів та ергономіки бронежилетів, а також встановлює процедури випробувань для визначення рівня захисту. Крім того, в стандарті визначено методи випробувань, що повинні використовуватися для перевірки відповідності бронежилетів вимогам, включаючи випробування на пробійність, стійкість до зношування, витривалість, стійкість до впливу низьких температур і т.д.

Стандарт ДСТУ 8782:2018 передбачає 6 класів захисту бронежилетів від куль, а також 3 спеціальних класу захисту (табл.2, табл.3).

Таблиця 2 – Засоби ураження основних класів захисту (кулетривкості) бронежилетів

Клас захисту	Калібр засобу ураження	Тип та умовне позначення кулі	Маса кулі, г	Дистанція обстрілу, м	Швидкість кулі, м/с
1	9 × 18 мм (9 mm Makarov)	Пст, (57-Н-181с)	5.9	5	335 ± 10
	9 × 19 мм (9 mm Luger, 9 mm Parabellum, 9 × 19 mm)	FMJ RN SC	8.0	5	400 ± 10
2	7.62 × 25 мм (7.62 × 25 Tokarev)	Пст, (57-Н-134с)	5.5	5	430 ± 15
3	5.45 × 39 мм (5.45 × 39)	ПС, (7Н6)	3.4	10	910 ± 15
	7.62 × 39 мм (7.62 × 39)	ПС, (57-Н-231)	7.9	10	730 ± 15
4	5.45 × 39 мм (5.45 × 39)	ПП (7Н10)	3.6	10	910 ± 15
	7.62 × 54 мм (7.62 × 54 R)	ЛПС (57-Н-323с)	9.6	10	850 ± 15
5	5.45 × 39 мм (5.45 × 39)	БЗ (57-БЗ-231)	7.4	10	745 ± 15
	7.62 × 54 мм (7.62 × 54 R)	ЛПС (57-Н-323с)	9.6	10	850 ± 15
6	7.62 × 54 мм (7.62 × 54 R)	Б-32 (7-БЗ-3, 7-БЗ-323)	10.4	10	860 ± 15

Таблиця 3 – Засоби ураження спеціальних класів захисту бронежилетів

Клас захисту	Характеристика засобів ураження				Умови випробування
	Засіб ураження	Конструкція засобів ураження	Маса кулі, г	Характеристика засобу ураження	Дистанція обстрілу, м
СХ	Холодна зброя (ніж, шило)	Згідно з В.4 ДСТУ 8788	—	Енергія удару 40 Дж	—
СМ	Мисливський патрон 12-го калібру	Куля Vrenneke Silver, свинцева без оболонки	3 9.0	Швидкість кулі (400 ± 15) м/с	10
СО	Уламки снарядів, мін або ручних гранат	Характеристики засобів ураження та умови випробування визначають відповідно до нормативного документа виробника бронежилета та/чи умов контракту (договору) між виробником та замовником			

### Категорії засобів індивідуального захисту

Сучасний ринок пропонує різноманітні бронежилети з різним рівнем захисту від різних загроз. Зазвичай їх поділяють на приховані (внутрішнього носіння) та відкриті (зовнішнього) залежно від гнучкості, способу носіння та умов, в яких вони носяться.

Конструкції прихованих бронежилетів розроблені таким чином, щоб їх можна було носити під стандартними уніформами або іншим одягом (рис.1). Вони підходять для використання там, де потрібний менший рівень захисту, наприклад, у поліцейських та працівників служби охорони. Відкриті бронежилети, зазвичай, мають більш громіздкий дизайн та складаються з твердих панелей, які надіваються поверх одягу. Такий тип бронежилетів використовується службовцями, які знаходяться в умовах підвищеного ризику, наприклад, військовими.



а



Рисунок 1 – Бронежилет: а – прихованого типу; б – зовнішнього типу

Всі бронежилети складаються з трьох основних шарів: зовнішнього чохла, захисного покриття та захисних елементів. Чохол використовується для закріплення балістичних панелей на тілі людини та зазвичай виготовляється з типових тканин для одягу, таких як нейлон або бавовна. Матеріали, з яких виробляють захисні чохла, не повинні підтримувати процесу горіння та погіршувати свої властивості під впливом мастил, бензину, органічних розчинних речовин під час чищення чохла. Захисні елементи, зазвичай, виготовляються окремо від чохла з багатошарових матеріалів для забезпечення потрібного рівня захисту. Захисне покриття – це прошарок між зовнішнім чохлом та захисними елементами, що допомагає захистити матеріал захисних елементів від зовнішнього середовища [12].

Згідно з конструктивним виконанням, бронежилети поділяють на три типи: м'які (гнучкі), напівжорсткі та жорсткі.



Рисунок 2 – Структура бронежилета **Жорсткі захисні бронежилети.**

Жорстка броня, зазвичай, використовується військовими та правоохоронними органами для

захисту від гвинтівок, швидкість куль яких може складати понад 500 м/с. Вона розроблена шляхом поєднання м'якого текстильного бронежилета з жорсткими матеріалами, такими як металеві пластини (сталь або титан), керамічні пластини, пластини з поліетилену, карбіда кремнію, карбіда бору або композитних матеріалів.

Вага жорстких бронепластин може сягати від 1.4 кг до 3.0 кг. Керамічні матеріали, такі як алюміній ( $Al_2O_3$ ) та карбід кремнію (SiC), є поширеними матеріалами для жорсткої броні та забезпечує захист на рівні типу III (для гвинтівок) та IV (для бронебійних гвинтівок) за стандартом NIJ. Вона також складається з керамічних частин, поєднаних з композитним підсиленням на основі епоксидної смоли, для досягнення кращої гнучкості, легкості та балістичної ефективності порівняно з чистими керамічними плитами [13].

На сьогоднішній час, широку увагу дослідників привертають системи ламінованих композитів на основі текстильних волокон. Це переважно через зменшення ваги зі збереженням рівня стійкості до ударів. Так, наприклад, додавання невеликої кількості смоли (20%) при обробці тканин допомагає краще поглинати енергію, зберігаючи при цьому гнучкість, ніж вищі значення смоли, які обмежують розподіл навантаження між нитками [14]. Додавання вінілестерових смол на тканини з Dyneema® у гнучкий бронежилет рівня II за стандартом NIJ може підвищити рівень балістичного захисту до рівня III. Крім того, різні дослідження проводяться для вивчення балістичної стійкості та характеристик гнучкості різних композитів на основі волокон, що використовуються як тверді бронежилети [15-17].

#### **М'які (гнучкі) та напівжорсткі бронежилети.**

М'які бронежилети зазвичай виготовляють з багатьох шарів (від 20 до 50) гнучких балістичних матеріалів з високопродуктивних волокон. Такі бронежилети важать менше 4.5 кг і можуть мати різну форму. Загалом, м'який бронежилет може захистити від низького до середнього рівня вогнепальних загроз. Згідно зі стандартами NIJ, м'який бронежилет включає рівень IIА, рівень II та рівень IIIА. У цілому, такі бронежилети підходять для захисту від пістолетних куль, а також добре пристосовані до контуру тіла, що забезпечує високий рівень комфорту.

Більша кількість шарів, зазвичай, робить конструкцію важкою та менш гнучкою, що обмежує мобільність і комфорт для носія. Тому цілком дослідників та виробників є винахід відповідних методів та матеріалів для досягнення легких, гнучких та комфортних бронежилетів [18].

**Мета дослідження, постановка задачі.** У зв'язку з тим, що оборонна здатність України потребує посилення та розвитку прямопропорційного сучасним розробкам озброєння необхідно приділити увагу саме питанням безпековості засобів особистого захисту. Звідси випливає, що саме інновації будуть рушійною силою для поліпшення оборонної здатності країни. Таким чином для створення нових технічних рішень

щодо розвитку характеристик засобів індивідуального захисту необхідно мати поглиблений аналіз інуючих, та розуміння основних факторів змінності поточної ситуації.

#### **Матеріали дослідження.**

#### **Перспективи розвитку матеріалів для виробництва бронезилетів**

Матеріали, які використовуються для виготовлення броньованих елементів, можуть бути різними, залежно від конкретного призначення бронезилету та необхідного рівня захисту. Для виготовлення бронезилетів найвищого рівня захисту, наприклад, NIJ Level IV, використовуються найбільш ефективні та стійкі матеріали, зокрема [19-21]:

1. Сталеві листи – це може бути звичайна вуглецева сталь або легована сталь, така як хромом, молібденом, нікелем або бором, що дозволяє досягти певного рівня твердості та міцності.

2. Кераміка – наприклад, оксид алюмінію, карбід бору (борид), карбід кремнію (силікон карбід), які мають високу твердість та стійкість до зношування, а також мають відносно низьку масу.

3. Арамідні волокна: це пластмаси, створені на основі полімерних матеріалів, таких як Kevlar, які мають високу міцність і здатні абсорбувати енергію удару.

4. Сплави титану - наприклад, титанова сталь або титанові листи, які мають високу міцність та стійкість до корозії.

5. Сплави бору - наприклад, борид титану (TiB), які мають високу твердість та стійкість до зношування.

6. Жорсткі пластмаси - наприклад, поліетилен високої щільності (HDPE), які можуть поглинати енергію удару та мати високу міцність.

Вищезгадані матеріали були основою для виробництва бронезилетів впродовж останніх десятиліть. Ці матеріали є важкими та жорсткими, тому досягнення кращих балістичних результатів здійснювалося за рахунок збільшення ваги та, як наслідок, погіршення рівня комфорту для носіїв. На сьогоднішній день, завдяки використанню високопродуктивних волокон у системах бронезахисту, можливо отримати легкі та м'які бронезилети з достатньо високим рівнем балістичного захисту. Далі будуть розглянуті деякі з новітніх та перспективних матеріалів, які можуть відіграти важливу роль у досягненні наступного етапу розвитку бронезилетів.

#### **Вуглецеві наноматеріали**

Вуглецеві наноматеріали - це атомні структури, побудовані з аморфних типів вуглецю, головним чином фулеренів та графіту. Вони складаються з кристалічних структур зі сильними зв'язками між атомами вуглецю. В залежності від розташування та комбінації цих структур вони можуть утворювати одно- або двовимірні формації. В загальному, вуглецеві наноматеріали можуть мати будь-яку з вимірів, згаданих у попередньому розділі [22].

До цієї групи матеріалів відноситься графен, що представляє собою двовимірний матеріал, який був відкритий у 2004 році А. Геймом та К. Новосьоловим. Один з нових методів одержання графену - метод Flash Joule Heating (FJL), розроблений Луонгом та ін. [23]. Графен, отриманий за допомогою цього методу, називається «Flash Graphene» і виготовляється шляхом перетворення аморфного вуглецю за допомогою розряду високовольтної електрики, що нагріває порошок вуглецю до 3000 К. Весь процес відбувається в кварцовій трубі під атмосферним тиском або слабким вакуумом. Інший метод, який може бути використаний у промисловості, це електрохімічне шарування, розроблене Крістеком та ін. [24]. Їх метод електрохімічного шарування графену дозволяє отримувати вищу продуктивність - близько 200 мг електрохімічно експлоатованого графену за 180 хвилин електролізу, порівняно з ~10 мг за 10 хвилин для класичного електрохімічного процесу шарування.

Графен, завдяки своїм фізичним властивостям, є одним із найбільш перспективних і досліджуваних вуглецевих наноматеріалів. Його висока теплопровідність близько 5000 Вт/мК та електронна мобільність до 200000 см<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup> дозволяють використовувати графен у самовідчутних та енергозберігаючих матеріалах. Водночас, його надзвичайні механічні властивості, такі як міцність при розтягу 130 ГПа і модуль Юнга 1 ТПа, роблять графен життєздатним матеріалом для використання як підсилюючої фази в композитних матеріалах [25].

Університет Райс в Хьюстоні разом із Defense Threat Reduction Agency та Welch Foundation, яка фінансує хімічні дослідження, проводить дослідження можливості використання графену як бронезилетів. Вчені створили тест на зіткнення графенових пластинок із "мікрокулями", використовуючи процес під назвою laser-induced projectile impact test (LIPIT). Цим лазерним процесом вони змогли запускати "мікрокулі" зі швидкістю до 3 км / с, що вище за швидкість куль, що вилітають з автомату АК-47 [26].

Для проведення експерименту, науковці розмістили багатошарові аркуші графену, отримані з масивного графіту, товщина яких коливалась від 10 до 100 нанометрів. Після цього вони за допомогою високошвидкісної камери зафіксували зображення проєкцій перед та після зіткнення з графеном, а також використовували мікроскопічні зображення, щоб оцінити завдані пошкодження. У кожному випадку мікрокулі частково прорізали графен, але не залишили охайної дірки. Замість цього вони відмітили наявність системи тріщин навколо кожної точки удару, що свідчило про те, що графен розтягувався перед розривом. (рис. 3).



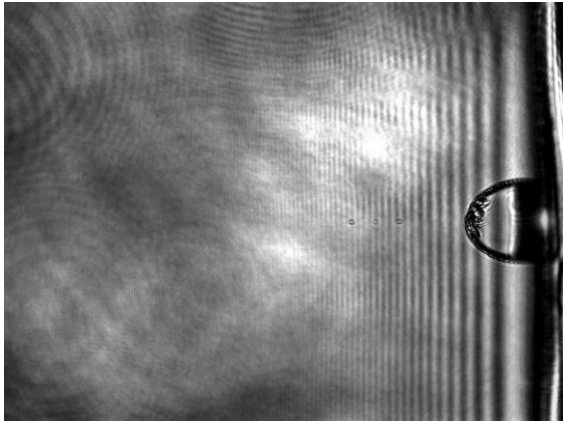


Рисунок 3 – Результат обстрілу графенової пластини [27]

Також серед перспективних вуглецевих наноматеріалів виділяють карбонові нанотрубки, що були вперше описані Суміо Іджіма в 1991 році і відносяться до одновимірних наноматеріалів. Нанотрубки складаються з безшовних, скручених пластин графену, закритих на кінці з половиною фулерена, і зазвичай класифікуються в одну з двох груп: одностінні карбонові нанотрубки (SWCNT) або багат шарові карбонові нанотрубки (MWCNT). Діаметр SWCNT становить від 1 до 2 нм, тоді як для MWCNT, які є здобутком SWCNT, - від 2 до 100 нм [28].

Подібно до графену, CNT мають відмінні механічні властивості. Модуль Юнга, сягає значень 1,28 ТПа, хоча зазвичай його приймають за 1,0 ТПа [28]. Межа пружності SWCNT відома у межах до 500 ГПа [29], а для MWCNT експериментальні результати показують значення в межах від 11 до 63 ГПа [30].

Вивчалася можливість використання вуглецевих нанотрубок як матеріалу для підвищення механічних властивостей кераміки, зокрема за допомогою показника стійкості до розламу, що, ймовірно, поліпшить їх стійкість проти куль. Недавні дослідження [31] показали, що включення CNT до кераміки, такої як оксид алюмінію і карбід кремнію, може сильно впливати на мікроструктуру, режим розлому та механічні властивості. Значне покращення до 94% стійкості до розламу було спостережено при додаванні 4 об'ємних % CNT до оксиду алюмінію.

Дослідники з Військового університету технологій в Польщі провели чисельні моделювання [32], щоб визначити балістичну ефективність CNT-армованого алюмінієвого сплаву 7017. Їхня чисельна модель аналізувала удар гострої кулі на композитну металеву пластину за допомогою методів скінченних елементів, і чітко показала, що армування вуглецевими нанотрубками відіграє важливу роль у визначенні загальної балістичної стійкості композитної пластини.

*Псевдопластичні рідини (STF).* Псевдопластична рідина, яка є ньютонівською рідиною, зазвичай складається з концентрованих колоїдних дисперсій, що містять тверді частки (силіка, карбонат кальцію, карбід кремнію тощо) в дисперсійній рідині (вода,

поліетиленгліколь, етиленгліколь, силіконова олія тощо). Це допомагає проявити раптове збільшення в'язкості при досягненні критичної швидкості зсуву, що перетворює рідку дисперсію на матеріал з властивостями твердого тіла.

Зараз досягнуто значне покращення продуктивності м'яких бронезилетів за допомогою різних передових механізмів, включаючи STF [33-35]. Застосування псевдопластичних рідин призвело до розвитку концепції "рідинних" бронезилетів, які забезпечують кращий захист від куль та інших видів травм. Однак механізм поглинання енергії від структури тканин, які були оброблені псевдопластичною рідиною, потребує подальших досліджень та кількісної перевірки для кращого розуміння.

Різні дослідники у науковому світі працювали над застосуванням, дослідженням та аналізом впливу STF на кінцеві характеристики бронезилетів різних форм. В основному, дослідники вивчали нанесення псевдопластичних рідин з різною в'язкістю на тканини з кевлару. Більшість результатів [36-38] показує покращення загальної здатності поглинати енергію удару м'яких панелей і композитів при збільшенні в'язкості рідини. Наприклад, одне з досліджень недавно досліджувало деформацію та механізми поглинання енергії псевдопластичними рідинами (STF) оброблених і необроблених тканин з Кевлару під час удару. Аналіз показав, що, на відміну від необроблених тканин, оброблені тканини мають більшу кількість ниток, які беруть участь у розподілі навантаження та поглинанні енергії [39]. Таким чином, обмежене використання ниток нарешті призводить до меншого поглинання енергії порівняно з тканинами, обробленими псевдопластичними рідинами, де рідина перетворила тканину в матеріал зі схожими властивостями з твердим тілом (за участю всієї тканини у розподілі навантаження та поглинанні енергії).

**Методи дослідження.** В умовах підвищених термосилових впливів, які реалізуються в зоні контакту з перепону, у міру збільшення швидкості ударних фрагментів міцнісні властивості матеріалів перепон різко знижуються, вони піддаються інтенсивним деформаціям і швидко спрацьовуються, а конструкції на їхній основі не виконують основні захисні функції. Саме це стало однією із основних причин застосування багат шарових пакетів при розробці та створенні засобів індивідуального захисту.

Процес ударної взаємодії ударників із перепону поділяється на дуже коротку початкову ударно-хвильову стадію і наступну досить тривалу стадію динамічного деформування та (або) проникання ударника в перепону без виражених ударно-хвильових процесів. Ударно-хвильова стадія взаємодії характеризується наявністю інтенсивних ударних хвиль і хвиль розрідження, як у перешкоді, так і в ударнику. Максимальний тиск рув на межі розділу ударник - перешкода, що розвивається на ударно-

хвильовій стадії, можна оцінити за допомогою співвідношення (1):

$$p_{ух} = \frac{(\rho c)_{перешкода} (\rho c)_{ударник}}{(\rho c)_{перешкода} + (\rho c)_{ударник}} v_{ударник}, \quad (1)$$

де  $\rho$  - щільність матеріалу,  $c$  - швидкість звуку,  $v_{ударник}$  - швидкість ударника.

На подальшій стадії динамічної взаємодії ударника з жорсткою перешкодою контактний тиск  $p_k$  можна оцінити за допомогою двочленної залежності, що враховує як властивості міцності, так і тиск швидкісного напору матеріалу ударника (2):

$$p_k = \sigma_{длт} + k \cdot \rho_{ударник} \cdot v_{ударник}^2, \quad (2)$$

де  $\sigma_{длт}$  - динамічна межа плинності матеріалу ударника;  $k$  - коефіцієнт форми.

В іноземній науковій літературі для опису динамічного деформування крихких матеріалів широко використовують модель Джонсона-Голмквіста (Johnson-Holmquist). У цій моделі межа міцності крихкого матеріалу, а в процесі його руйнування змінюється від межі міцності вихідного неушкодженого матеріалу  $\zeta_0$  до межі міцності повністю зруйнованого (подрібненого) матеріалу  $\zeta_p$ . Відповідне рівняння (Damage) має вигляд (3):

$$\sigma = \sigma_0 - D(\sigma_0 - \sigma_p), \quad (3)$$

де  $D$  - пошкодженість ( $0 \leq D \leq 1$ ).

Пошкодженість визначається як відносна накопичена пластична деформація (4):

$$D = \sum (\Delta \varepsilon_{nl} / \varepsilon_{nl}^p), \quad (4)$$

де  $\Delta \varepsilon_{nl}$  - елементарна пластична деформація;  $\varepsilon_{nl}^p$  - умовна гранична пластична деформація за постійного тиску  $p$ , за якого відбувається руйнування крихкого матеріалу.

$$\varepsilon_{nl}^p = D_1 (P - T_p)^{D_2}, \quad (5)$$

де  $P = p/Y$  - безрозмірний тиск,  $Y$  - гюгонієвська межа пружності,  $T_p$  - безрозмірне максимальне напруження всебічного розтягування, яке може витримати матеріал без руйнування,  $D_1, D_2$  - постійні.

Межі міцності неушкодженого (Intact Surface) і повністю зруйнованого (Fractured) матеріалів залежать від поточних тиску і швидкості деформації  $\dot{\varepsilon}$  (6-7):

$$\sigma_0 = A(P + T_p)^N \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right), \quad (6)$$

$$\sigma_p = B P^M \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right), \quad (7)$$

де  $A, N, C, B, M$  - постійні.

При ударному впливі полімерні матеріали демонструють складну поведінку, пов'язану з послідовною зміною

мікроструктурних механізмів деформування в міру зростання деформацій.

Ударний вплив означає деформування тіла з великою швидкістю. Якщо ця швидкість перевищує швидкість поширення пружної деформації, то зразок руйнується в місці прикладання навантаження, якщо не перевищує, то зразок руйнується по всьому об'єму.

Опір полімерів ударним навантаженням характеризується так званою ударною в'язкістю, величина якої, що виражається в Дж/м<sup>2</sup>, чисельно дорівнює роботі руйнування  $\Delta A$ , віднесеної до одиниці площі поперечного перерізу зразка  $S$  (8):

$$a = \Delta A / S, \quad (8)$$

де  $a$  - ударна в'язкість;  $S = b \cdot h$  ( $b$  - ширина,  $h$  - товщина зразка).

Принципове значення для адекватного опису реальних властивостей полімерних матеріалів має врахування релаксаційних процесів, що відбуваються під час зовнішніх впливів. У побудованій моделі це здійснюється через залежність часу релаксації дотичних напружень від параметрів, що характеризують стан середовища.

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - a_0 \sigma_{ин} + a_1 \dot{\varepsilon}}{RT}\right),$$

де  $U_0$ ,  $\sigma_{ин}$ ,  $\dot{\varepsilon}$  - енергія активації, інтенсивність напружень і деформацій;  $a_0, a_1$  - інтерполяційні константи

#### Шляхи вдосконалення бронейних властивостей засобів індивідуального захисту.

Необхідно зазначити, що вирішення задачі вдосконалення бронейних властивостей засобів індивідуального захисту, з якими доводиться стикатися дослідникам та інженерам в сучасних умовах, не піддаються аналітичному розв'язанню або вимагають величезних витрат на експериментальну реалізацію. Прогрес у розробленні чисельних методів і комп'ютерного моделювання дав змогу істотно розширити коло завдань, доступних аналізу. Отримані на основі цих методів результати використовують практично у всіх галузях науки і техніки. Метод скінченних елементів (МСЕ) є потужним, надійним і сучасним засобом дослідження поведінки конструкцій в умовах різноманітних впливів. Засоби МСЕ ANSYS дають змогу проводити розрахунки статичного і динамічного напружено-деформованого стану конструкцій, зокрема геометрично і фізично нелінійних задач механіки деформівного твердого тіла. Це дає змогу розв'язати широке коло інженерних задач. У зв'язку з тим задачі вдосконалення бронейних властивостей засобів індивідуального захисту перспективно вирішувати на початковому етапі за рахунок використання цифрових інструментів аналізу МСЕ. Нами виконані початкові дослідження шляхів вдосконалення бронейних властивостей засобів індивідуального захисту (рис.4- рис.6).



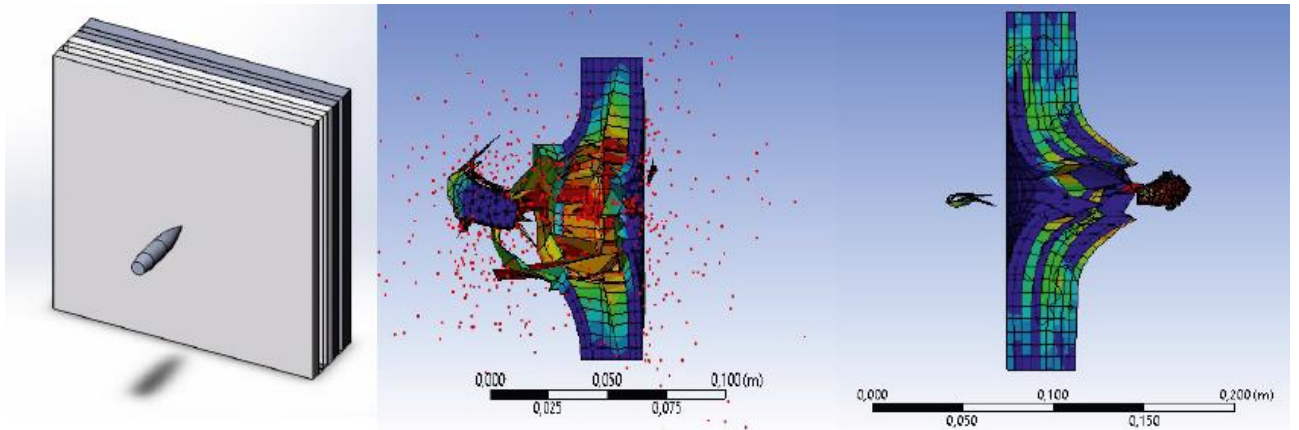


Рисунок 4 - Використання цифрових інструментів аналізу МСЕ з метою вдосконалення бронейних властивостей засобів індивідуального захисту

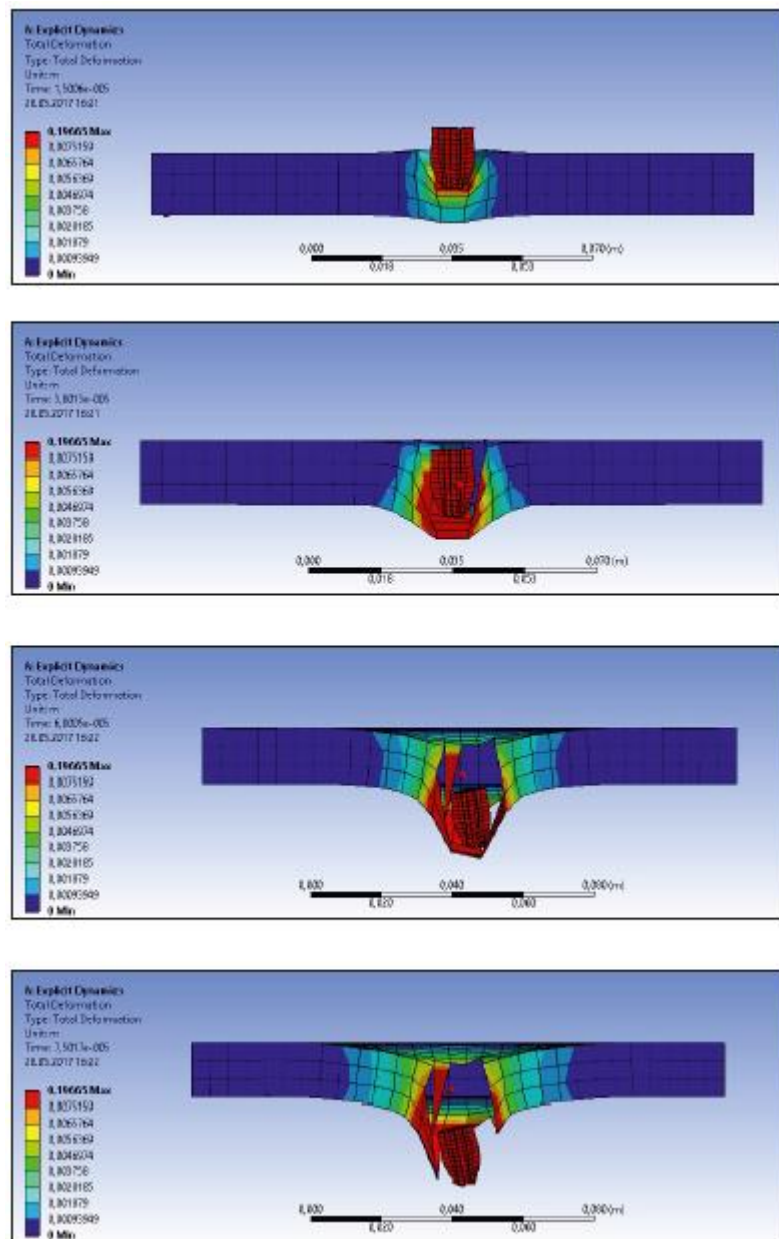


Рисунок 5 – Дослідження взаємодії ударника із пластичною перешкодою

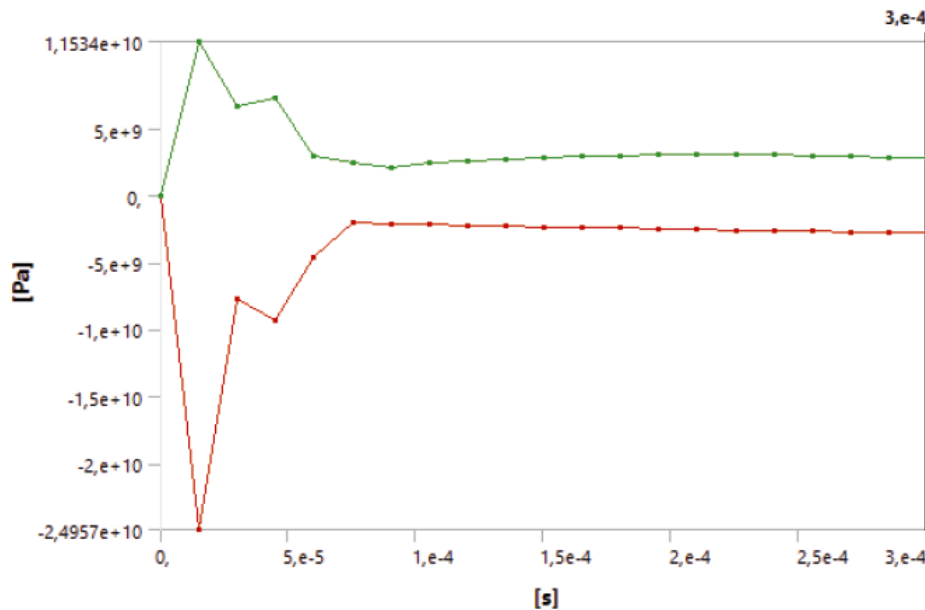


Рисунок 6 – Розподіл напружень в перешкоді

У майбутніх роботах буде досліджено процеси високошвидкісної взаємодії ударників із багат шаровими перешкодами різної товщини, буде отримано залежності деформування і руйнування пластин за варіації лицьового і тильного шарів перешкоди. Результати моделювання дадуть змогу зробити висновок про те, як ударна міцність виробів із чистого листового матеріалу корелює з показником руйнування багат шарового пакета. Вибір галузі дослідження обґрунтовано поточними проблемами ударного навантаження елементів конструкцій, що обґрунтовує актуальність дослідження для цілей оборони, технічних застосувань.

#### Висновки.

У результаті виконання оглядового дослідження було розглянуто коротку характеристику засобів захисту індивідуального характеру. У зв'язку з поточною ситуацією в Україні, яка пов'язана з військовими діями Росії проти України, зростає необхідність пошуку нових технічних рішень зі створення та обробки бронейних пластин засобів індивідуального захисту. Це пов'язано з постійним розвитком бронейних вимог, обґрунтованих розвитком засобів руйнівної здатності. Тому необхідну задачу потрібно вирішити методом створення більш зміцненого композитного матеріалу, який міг би витримати зіткнення із засобом з підвищеною руйнівною здатністю різного розміру.

#### Список літератури

1. Lewis E, Carr DJ. Personal armor. In: *Lightweight ballistic composites*. Elsevier Ltd, pp. 217-229.
2. Richard A. Carlson. Pleated ballistic package for soft body armor. USA: US20100313321 A1; 2010.
3. Messiry M El, El-tarfawy S. Performance of weave structure multi-layer bulletproof flexible armor. In: *The 3rd conference of the national campaign for textile industries, NRC cairo*, "Recent

manufacturing technologies and human and administrative development"; 2015. p. 218-25. Cairo.

4. Wanger L. Military and law enforcement applications. In: Bhatnagar A (ed) *Lightweight ballistic composites*. Abington Hall, Abington, Cambridge CB1 6AH, England: Woodhead Publishing, pp. 1e25.

5. Smith WC. An overview of protective clothing-markets, materials, needs. USA: Greer, SC; 1999.

6. Bhatnagar A, Arvidson B, Pataki W. *Lightweight ballistic composites, military and law-enforcement applications*. Woodhead Publishing; 2006. p. 213-4.

7. Michael B. Mukasey, Jeffrey L. Sedgwick, David W. Hagy. *Ballistic Resistance of Body Armor* NIJ Standard-0101.06. STANDARDS. U.S. Department of Justice, Office of Justice Programs, National Institute of Justice, Washington, USA, 2008. Available online: <https://www.ojp.gov/nij> (last visit 10.02.2023).

8. Intelligent Armour. Insight not hindsight. Available online: <http://www.body-armor-protection.co.uk/stanag-protection-levels.html> (last visit 10.02.2023).

9. NSA/0723-PPS/2920. STANAG 2920 PPS (Edition 2) - Ballistic Test Method For Personal Armour Materials and Combat Clothing. NATO Standardization Agency - Agence OTAN de Normalisation. Brussels, Belgium, 2003. Available online: [http://www.english1.com/site/wp-content/uploads/8\\_stanag\\_2920.pdf](http://www.english1.com/site/wp-content/uploads/8_stanag_2920.pdf) (last visit 10.02.2023).

10. D. Carr, E.A. Lewis, 6 - Ballistic-protective clothing and body armour, Editor(s): Faming Wang, Chuansi Gao, In *Woodhead Publishing Series in Textiles, Protective Clothing*, Woodhead Publishing, 2014, pp. 146-170. <https://doi.org/10.1533/9781782420408.1.146>.

11. ДСТУ 8782:2018. Засоби індивідуального захисту. Бронезилети. Класифікація. Загальні технічні умови. Київ. ДП "УкрНДНЦ", 2019.

12. Wanger L. Military and law enforcement applications. In: Bhatnagar A (ed) *Lightweight ballistic composites*. Abington Hall, Abington, Cambridge CB1 6AH, England: Woodhead Publishing, pp. 1-25.

13. David NV, Gao X-L, Zheng JQ. Ballistic resistant body armor: contemporary and prospective materials and related protection mechanisms. *Appl Mech Rev* 2009; 62:050802.

14. Azrin Hani AR, Roslan A, Mariatti J, et al. Body armor technology: a review of materials, construction techniques and enhancement of ballistic energy absorption. *Adv Mater Res* 2012;488-489:806-12.

15. Da Luz FS, Monteiro SN, Lima ES, et al. Ballistic application of coir fiber reinforced epoxy composite in multilayered armor. *Mater Res* 2017;20: 23-8

16. Cwik TK, Iannucci L, Curtis P, et al. Design and ballistic performance of hybrid composite laminates. *Appl Compos Mater* 2017; 24:717-33.
17. Hogg PJ. Composites in armor. *Science* 2006; 314:1100-1
18. Nayak R, Crouch I, Kanesalingam S, et al. Body armor for stab and spike protection , Part 1: scientific literature review. *Textil Res J* 2017;1-21.
19. Fejdyś, Marzena & Kośła, Katarzyna & Kucharska-Jastrzābek, Agnieszka & Landwijt, Marcin. (2020). Influence of ceramic properties on the ballistic performance of the hybrid ceramic–multi-layered UHMWPE composite armour. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 57. 10.1007/s41779-020-00516-7.
20. Abteu, Mulat & Boussu, François & Bruniaux, Pascal. (2021). Dynamic impact protective body armour: A comprehensive appraisal on panel engineering design and its prospective materials. *Defence Technology*. 17. 10.1016/j.dt.2021.03.016.
21. Ramanjaneyulu, Komatineni & Mahapatra, Manoj & Vemuri, Madhu & Bhat, T & Fotedar, R & Suri, A.K.. (2006). Boron Carbide For Armour Applications.
22. Thostenson ET, Li C, Chou TW. Nanocomposites in context. *Compos Sci Technol* 2005;65:491-516
23. Luong, D.X.; Bets, K.V.; Algozeeb, W.A.; Stanford, M.G.; Kittrell, C.; Chen, W.; Salvatierra, R.V.; Ren, M.; McHugh, E.A.; Advincula, P.A.; et al. Gram-Scale Bottom-up Flash Graphene Synthesis. *Nature* 2020,577, 647–651.
24. Krystek, M.; Pakulski, D.; Patroniak, V.; Górski, M.; Szojda, L.; Ciesielski, A.; Samorì, P. High-Performance Graphene-Based Cementitious Composites. *Adv. Sci.* 2019,6, 1801195
25. Bolotin, K.I.; Sikes, K.J.; Jiang, Z.; Klima, M.; Fudenberg, G.; Hone, J.; Kim, P.; Stormer, H.L. Ultrahigh Electron Mobility in Suspended Graphene. *Solid State Commun.* 2008,146, 351–355
26. Lee, Jae-Hwang & Loya, Phillip & Lou, Jun & Thomas, Edwin. (2014). Dynamic mechanical behavior of multilayer graphene via supersonic projectile penetration. *Science*. 346. 1092-1096. 10.1126/science.1258544.
27. Graphene Body Armor and Shielding. Available online: <https://www.herox.com/blog/154-graphene-body-armor-and-shielding> (last visit 10.02.2023).
28. Kim, G.M.; Nam, I.W.; Yang, B.; Yoon, H.N.; Lee, H.K.; Park, S. Carbon Nanotube (CNT) Incorporated Cementitious Composites for Functional Construction Materials: The State of the Art. *Compos. Struct.* 2019,227, 111244.
29. Han, B.; Sun, S.; Ding, S.; Zhang, L.; Yu, X.; Ou, J. Review of Nanocarbon-Engineered Multifunctional Cementitious Composites. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 2015,70, 69–81.
30. Yu, M.-F.; Lourie, O.; Dyer, M.J.; Moloni, K.; Kelly, T.F.; Ruoff, R.S. Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load. *Science* 2000,287, 637–640.
31. Momohjimoh I, Hussein MA, Al-Aqeeli N. Recent Advances in the Processing and Properties of Alumina-CNT/SiC Nanocomposites. *Nanomaterials* (Basel). 2019 Jan 11;9(1):86. doi: 10.3390/nano9010086. PMID: 30641855; PMCID: PMC6358954.
32. Kazmierski, Tom & Zhou, Dafeng & Al-Hashimi, Bashir & Ashburn, Peter. (2010). Numerically Efficient Modeling of CNT Transistors With Ballistic and Nonballistic Effects for Circuit Simulation. *Nanotechnology, IEEE Transactions on*. 9. 99 - 107. 10.1109/TNANO.2009.2017019.
33. Wagner NJ, Brady JF. Shear thickening in colloidal dispersions. *Phys Today* 2009;62:27e322.
34. Majumdar A, Butola BS, Srivastava A. Optimal designing of soft body armour materials using shear thickening fluid. *Mater Des* 2013;46:191-8.
35. Haris A, Lee HP, Tay TE, et al. Shear thickening fluid impregnated ballistic fabric composites for shock wave mitigation. *Int J Impact Eng* 2015;80: 143-51.
36. Kang TJ, Hong KH, Yoo MR. Preparation and properties of fumed silica/Kevlar composite fabrics for application of stab resistant material. *Fibers Polym* 2010;11:719-24.
37. Kalman DP, Merrill RL, Wagner NJ, et al. Effect of particle hardness on the penetration behavior of fabrics intercalated with dry particles and concentrated particle-fluid suspensions. *ACS Appl Mater Interfaces* 2009;1: 2602-12.
38. Tan VBC, Tay TE, Teo WK. Strengthening fabric armour with silica colloidal suspensions. *Int J Solid Struct* 2005;42:1561-76.
39. Majumdar A, Butola BS, Srivastava A. An analysis of deformation and energy absorption modes of shear thickening fluid treated Kevlar fabrics as soft body armour materials. *Mater Des* 2013;51:148-53

#### References (transliterated)

1. Lewis E, Carr DJ. Personal armor. In: *Lightweight ballistic composites*. Elsevier Ltd, pp. 217-229.
2. Richard A. Carlson. Pleated ballistic package for soft body armor. USA: US20100313321 A1; 2010.
3. Messiry M El, El-tarfawy S. Performance of weave structure multi-layer bulletproof flexible armor. In: *The 3rd conference of the national campaign for textile industries, NRC cairo, "Recent manufacturing technologies and human and administrative development"*; 2015. p. 218-25. Cairo.
4. Wanger L. Military and law enforcement applications. In: Bhatnagar A (ed) *Lightweight ballistic composites*. Abington Hall, Abington, Cambridge CB1 6AH, England: Woodhead Publishing, pp. 1e25.
5. Smith WC. An overview of protective clothing-markets, materials, needs. USA: Greer, SC; 1999.
6. Bhatnagar A, Arvidson B, Pataki W. *Lightweight ballistic composites, military and law-enforcement applications*. Woodhead Publishing; 2006. p. 213-4.
7. Michael B. Mukasey, Jeffrey L. Sedgwick, David W. Hagy. *Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06. STANDARDS*. U.S. Department of Justice, Office of Justice Programs, National Institute of Justice, Washington, USA, 2008. Available online: <https://www.ojp.gov/nij> (last visit 10.02.2023).
8. *Intelligent Armour. Insight not hindsight*. Available online: <http://www.body-armour-protection.co.uk/stanag-protection-levels.html> (last visit 10.02.2023).
9. NSA/0723-PPS/2920. STANAG 2920 PPS (Edition 2) - Ballistic Test Method For Personal Armour Materials and Combat Clothing. NATO Standardization Agency - Agence OTAN de Normalisation. Brussels, Belgium, 2003. Available online: [http://www.englands1.com/site/wp-content/uploads/8\\_stanag\\_2920.pdf](http://www.englands1.com/site/wp-content/uploads/8_stanag_2920.pdf) (last visit 10.02.2023).
10. D. Carr, E.A. Lewis, 6 - Ballistic-protective clothing and body armour, Editor(s): Faming Wang, Chuansi Gao, In *Woodhead Publishing Series in Textiles, Protective Clothing*, Woodhead Publishing, 2014, pp. 146-170, <https://doi.org/10.1533/9781782420408.1.146>.
11. DSTU 8782:2018. Personal protective equipment. Body armour. Classification. General technical conditions. Kyiv. SE "UkrNDNC", 2019.
12. Wanger L. Military and law enforcement applications. In: Bhatnagar A (ed) *Lightweight ballistic composites*. Abington Hall, Abington, Cambridge CB1 6AH, England: Woodhead Publishing, pp. 1-25.
13. David NV, Gao X-L, Zheng JQ. Ballistic resistant body armor: contemporary and prospective materials and related protection mechanisms. *Appl Mech Rev* 2009; 62:050802.
14. Azrin Hani AR, Roslan A, Mariatti J, et al. Body armor technology: a review of materials, construction techniques and enhancement of ballistic energy absorption. *Adv Mater Res* 2012;488-489:806-12.
15. Da Luz FS, Monteiro SN, Lima ES, et al. Ballistic application of coir fiber reinforced epoxy composite in multilayered armor. *Mater Res* 2017;20: 23-8
16. Cwik TK, Iannucci L, Curtis P, et al. Design and ballistic performance of hybrid composite laminates. *Appl Compos Mater* 2017; 24:717-33.
17. Hogg PJ. Composites in armor. *Science* 2006; 314:1100-1
18. Nayak R, Crouch I, Kanesalingam S, et al. Body armor for stab and spike protection , Part 1: scientific literature review. *Textil Res J* 2017;1-21.
19. Fejdyś, Marzena & Kośła, Katarzyna & Kucharska-Jastrzābek, Agnieszka & Landwijt, Marcin. (2020). Influence of ceramic properties on the ballistic performance of the hybrid ceramic–multi-layered UHMWPE composite armour. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 57. 10.1007/s41779-020-00516-7.
20. Abteu, Mulat & Boussu, François & Bruniaux, Pascal. (2021). Dynamic impact protective body armour: A comprehensive

appraisal on panel engineering design and its prospective materials. Defence Technology. 17. 10.1016/j.dt.2021.03.016.

21. Ramanjaneyulu, Komatineni & Mahapatra, Manoj & Vemuri, Madhu & Bhat, T & Fotedar, R & Suri, A.K.. (2006). Boron Carbide For Armour Applications.

22. Thostenson ET, Li C, Chou TW. Nanocomposites in context. Compos Sci Technol 2005;65:491-516

23. Luong, D.X.; Bets, K.V.; Algozeeb, W.A.; Stanford, M.G.; Kittrell, C.; Chen, W.; Salvatierra, R.V.; Ren, M.; McHugh, E.A.; Advincula, P.A.; et al. Gram-Scale Bottom-up Flash Graphene Synthesis. Nature 2020,577, 647–651.

24. Krystek, M.; Pakulski, D.; Patroniak, V.; Górski, M.; Szojda, L.; Ciesielski, A.; Samori, P. High-Performance Graphene-Based Cementitious Composites. Adv. Sci. 2019,6, 1801195

25. Bolotin, K.I.; Sikes, K.J.; Jiang, Z.; Klima, M.; Fudenberg, G.; Hone, J.; Kim, P.; Stormer, H.L. Ultrahigh Electron Mobility in Suspended Graphene. Solid State Commun. 2008,146, 351–355

26. Lee, Jae-Hwang & Loya, Phillip & Lou, Jun & Thomas, Edwin. (2014). Dynamic mechanical behavior of multilayer graphene via supersonic projectile penetration. Science. 346. 1092-1096. 10.1126/science.1258544.

27. Graphene Body Armor and Shielding. Available online: <https://www.herocx.com/blog/154-graphene-body-armor-and-shielding> (last visit 10.02.2023).

28. Kim, G.M.; Nam, I.W.; Yang, B.; Yoon, H.N.; Lee, H.K.; Park, S. Carbon Nanotube (CNT) Incorporated Cementitious Composites for Functional Construction Materials: The State of the Art. Compos. Struct. 2019,227, 111244.

29. Han, B.; Sun, S.; Ding, S.; Zhang, L.; Yu, X.; Ou, J. Review of Nanocarbon-Engineered Multifunctional Cementitious Composites. Compos. Part Appl. Sci. Manuf. 2015,70, 69–81.

30. Yu, M.-F.; Lourie, O.; Dyer, M.J.; Moloni, K.; Kelly, T.F.; Ruoff, R.S. Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load. Science 2000,287, 637–640.

31. Momohjimoh I, Hussein MA, Al-Aqeeli N. Recent Advances in the Processing and Properties of Alumina-CNT/SiC Nanocomposites. Nanomaterials (Basel). 2019 Jan 11;9(1):86. doi: 10.3390/nano9010086. PMID: 30641855; PMCID: PMC6358954.

32. Kazmierski, Tom & Zhou, Dafeng & Al-Hashimi, Bashir & Ashburn, Peter. (2010). Numerically Efficient Modeling of CNT Transistors With Ballistic and Nonballistic Effects for Circuit Simulation. Nanotechnology, IEEE Transactions on. 9. 99 - 107. 10.1109/TNANO.2009.2017019.

33. Wagner NJ, Brady JF. Shear thickening in colloidal dispersions. Phys Today 2009;62:27e322.

34. Majumdar A, Butola BS, Srivastava A. Optimal designing of soft body armour materials using shear thickening fluid. Mater Des 2013;46:191-8.

35. Haris A, Lee HP, Tay TE, et al. Shear thickening fluid impregnated ballistic fabric composites for shock wave mitigation. Int J Impact Eng 2015;80: 143-51.

36. Kang TJ, Hong KH, Yoo MR. Preparation and properties of fumed silica/Kevlar composite fabrics for application of stab resistant material. Fibers Polym 2010;11:719-24.

37. Kalman DP, Merrill RL, Wagner NJ, et al. Effect of particle hardness on the penetration behavior of fabrics intercalated with dry particles and concentrated particle-fluid suspensions. ACS Appl Mater Interfaces 2009;1: 2602-12.

38. Tan VBC, Tay TE, Teo WK. Strengthening fabric armour with silica colloidal suspensions. Int J Solid Struct 2005;42:1561-76.

39. Majumdar A, Butola BS, Srivastava A. An analysis of deformation and energy absorption modes of shear thickening fluid treated Kevlar fabrics as soft body armour materials. Mater Des 2013;51:148-53

Надійшла (received) 17.04.2023

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Доброворський Сергій Семенович (Dobrovorskiy Sergey)** – доктор технічних наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: [sdobro50@gmail.com](mailto:sdobro50@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1223-1036>

**Трубін Дмитро Володимирович (Trubin Dmytro)** – аспірант кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

**Басова Євгенія Володимирівна (Basova Yevheniia)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: [e.v.basova.khpi@gmail.com](mailto:e.v.basova.khpi@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8549-4788>

**Алексенко Борис Олександрович (Aleksenko Borys A.)** – докторант кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: [ttm777@ukr.net](mailto:ttm777@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9680-9370>

**Добровольська Людмила Георгіївна (Dobrovolska Ludmila)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: [lyudmyla@ukr.net](mailto:lyudmyla@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8318-8552>