

УДК 614.84(083.74):629.02:620.19(043.2)

В.В. Астанін, д-р техн. наук, проф., О.І. Олефір, канд. техн. наук, доцент, Г.О. Щегель, канд. техн. наук, В.В. Шаповал, канд. техн. наук, А.О. Олефір

КОМПОЗИЦІЙНІ ВОЛОКОННОЗМІЦНЕНІ ЗАХИСНІ КОНСТРУКЦІЇ В УМОВАХ УДАРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ

Для безпеки членів пожежних та рятувальних команд і збереження обладнання в умовах підвищеної ймовірності вибуху, розлітання уламків чи інших причин дії ударних навантажень досліджені волоконнозміцнені матеріали і сендвіч-конструкції та запропоновані захисні щити на їх основі, які характеризують підвищеною ударною міцністю в заданих діапазонах швидкостей удару.

Ключові слова: пожежна безпека, ударна міцність, волоконнозміцнені композити, сендвіч-конструкції, захисні щити

V. Astanin, Dr. of Sc. (Eng.), Prof., O. Olefir, Cand. of Sc. (Eng.), Sen. Lect., G. Schegel, Cand. of Sc. (Eng.), V. Shapoval, Cand. of Sc. (Eng.), A. Olefir

COMPOSITE FIBER-REINFORCED PROTECTIVE CONSTRUCTIONS UNDER IMPACT INTERACTION CONDITIONS

Fiber-reinforced materials and sandwich structures have been researched for the purpose of ensuring safety of members of the fire and rescue teams as well as their equipment under conditions of elevated probability of explosion, throw-out of debris, and other causes of impact loads effect. Some protective shields on their basis were proposed which are characterized with raised impact strength in the specified ranges of impact speed.

Keywords: fire safety, impact strength, fiber-reinforced composites, sandwich constructions, and protective shields

Однією із основних причин отримання травм членами оперативних рятувальних команд служби пожежогасіння поряд із термічними опіками у відповідності до даних статистики є пошкодження внаслідок удару. Висока ймовірність спричинених ударом травм пояснюється підвищеною небезпекою вибухів під час пожежі, спричинених згоранням опорних елементів руйнуванням великогабаритних конструкцій, термічним руйнуванням предметів побуту чи промислових об'єктів, зокрема ємностей під тиском. У кожному із перелічених випадків існує висока небезпека розлітання уламків, що можуть спричинити травмування, причому якщо місце падіння великогабаритних частин конструкцій можна передбачити, то зона пошкодження маломірними об'єктами, що розлітаються із великою швидкістю, значно ширша, причому вона зазвичай перебиває район локалізації допоміжної транспортної та рятувальної техніки на відстані від об'єкту, яка вважається безпечною з точки зору її розташування.

Перелічені фактори визначають важливість розробки удароміцних систем індивідуального захисту членів рятувальних команд, так само як і засобів захисту від ударного пошкодження рятувальної техніки та спеціальних транспортних засобів.

Перед системами захисту від ударного навантаження, що використовуються в рамках рятувальних операцій, висувається низка особливих вимог, що безпосередньо пов'язані із їх основним функціональним призначенням. Так, в [1] підкреслюється особлива небезпека для пожежно-рятувальних команд випадків розлітання уламків внаслідок вибуху під дією

полум'я. Така небезпека існує, незважаючи на вимоги до проектування будинків і споруд під час пожеж, вибухів та землетрусів [2], [3].

Міжнародні та національні стандарти, зокрема [4-6] розглядають як засоби перевірки обладнання та конструкцій на предмет вибухової небезпеки, так і спеціалізовані методи визначення ударозахисних властивостей спорядження рятувальних команд. Особливо детально вимоги до удароміцних матеріалів, зокрема для захисних жилетів та касок, розглянуто у [7]. Так, захисні жилети класу захисту ПА тестуються на удар із швидкістю 340...365 м/с ударником радіусом 9 мм з сферичною носовою частиною [5]. Небезпечні конфігурації стосовно співвідношення мас та швидкостей уламків у відповідності до частоти відповідних пошкоджень приводяться у [8].

Системи захисного бронювання повинні бути легкими, оптимально гнучкими, а також по можливості мати характеристики термо- та вологостійкості, опірності до хімічного впливу та корозії.

Суттєвим кроком до досягнення вказаних характеристик є застосування сучасних композиційних матеріалів в системах ударного захисту рятувальних груп. До легких композиційних матеріалів високої статичної та динамічної міцності відносяться волоконнозміцнені матеріали на основі вуглецевих, борних та ін. волокон та полімерної матриці. Їх перевагами у порівнянні із металевими та керамічними композитами є низька вага, що дозволяє їх використання у відповідних умовах при дотриманні обмежень з термічної стійкості. З точки зору економічної доцільності та технологічності виробництва оптимальним є застосування ламінатів на основі скловолокон.

Гібридоволоконні ламіновані композити на основі скловолокна та поліпропіленової матриці виготовляють шляхом технології гарячого пресування тканого препрегу. Матеріал розміщується у вакуумній камері і підлягає розігріву до температури 200 °С під тиском. Розглядаються матеріали із конфігурацією шарів $[0^\circ/90^\circ]_n$, що відповідає їх послідовному розташуванню з кутом взаємного повороту 90°. Товщина одиничного консолідованого шару становить 0,5 мм.

Вибір умов проведення дослідів та конфігурації ударника і зразків проводився з максимальним наближенням до вимог міжнародних стандартів [5], [9], [10]. В якості модельного пошкоджуючого фактора використовувався сталевий ударник. Побудова математичної моделі взаємодії та досягнення порівнянності результатів експерименту між собою суттєво спрощується при виключенні фактора впливу нерівномірності напружено-деформованого стану внаслідок впливу форми ударника та різних умов початкового контакту із поверхнею досліджуваних зразків матеріалу, зокрема кутом чи по площині, у різних експериментах однієї серії досліджень. У зв'язку з цим використовувався ударник у формі кулі. Його практична непошкоджуваність в усіх проведених експериментах досягалась завдяки високим вимогам до міцності та якості обробки поверхні. Матеріал ударника сталь 100CrMn6, твердість HRC 64, що відповідає розрахунковому значенню HB 590, діаметр 9 мм, маса 3 г. Дані проведення експерименту зведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Початкові умови, забезпечені при проведенні експериментального дослідження

Параметри проведення експерименту	Значення параметру	Розмірність
Форма зразка матеріалу	кругла	
Діаметр зразка матеріалу	0,2/0,06	м
Тип кріплення зразка матеріалу	Жорстке защемлення по колу	
Робоча область зразка матеріалу	$15 \cdot 10^{-2}/4 \cdot 10^{-2}$	м
Матеріал ударника	100CrMn6	
Форма ударника	шароподібна	
Діаметр ударника	$9 \cdot 10^{-3}$	м
Вага ударника	$3 \cdot 10^{-3}$	кг

Продовження таблиці 1

Параметри проведення експерименту	Значення параметру	Розмірність
Діапазон швидкостей взаємодії	20...1000	м/с
Діапазон початкових енергій взаємодії	$0,512 \cdot 10^{-3} \dots 1,28$	кДж
Температура проведення дослідів	20±2	°С
Атмосферний тиск	$10^5 \pm 20$	Па

Дослідження проводилися із використанням експериментального лабораторного комплексу, описаного у , що забезпечує ударну взаємодію у відповідності до приведеної на рисунку 1, а принципової схеми експерименту.

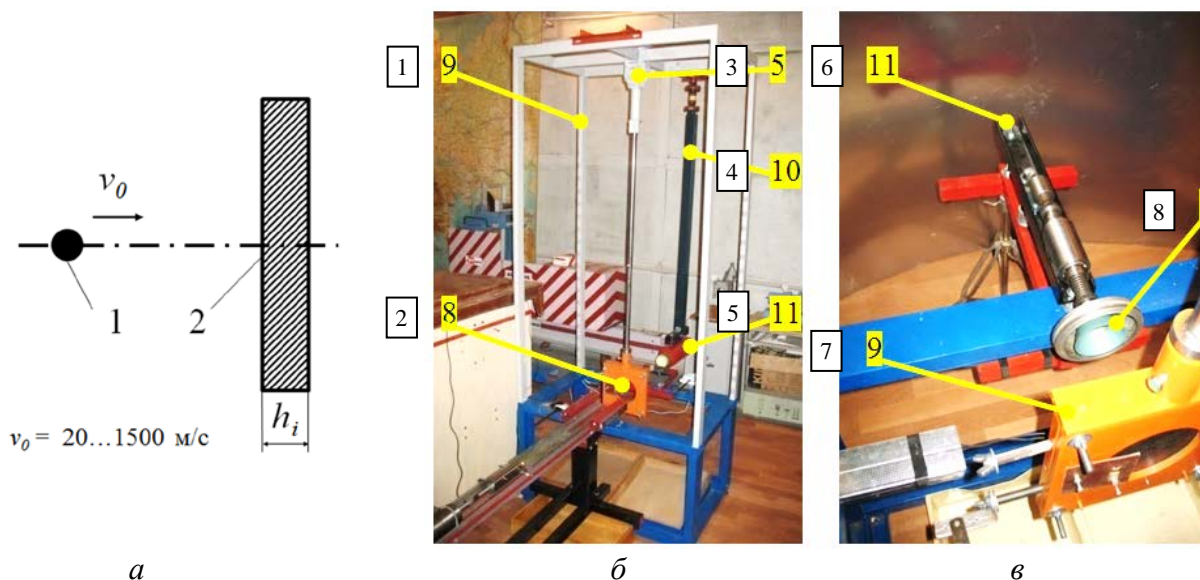


Рисунок 1 – Принципова схема дослідів (а) і система реєстрації перерозподілу енергії внаслідок ударної взаємодії (б)

1 – рама балістичного маятника; 2 – досліджуваний зразок; 3 – блок реєстрації відхилення підвісу від положення рівноваги основного балістичного маятника із зразком; 4 – допоміжний балістичний маятник для визначення залишкової кінетичної енергії ударника; 5 – уловлювач ударника; 6 – пружинний допоміжний маятник; 7 – рама кріплення зразка; 8 – уловлювач ударника чашкового типу.

На рисунку 1, б, в приведений загальний вигляд системи реєстрації перерозподілу енергії на основі балістичного маятника для визначення енергії, сприйнятої несучою конструкцією, на якій закріплений зразок, а також залишкової енергії ударника у випадку наскрізного пробивання матеріалу.

Перевагами застосування конструкції системи, представленої на рисунку 1, є висока точність визначення енергії ударника при малих габаритах дослідницької установки. Досліджувались зразки волоконнозміцненого матеріалу та сендвіч-конструкцій, зведена таблиця параметрів зразків приведена в таблиці 2.

Таблиця 2 – Початкові умови, забезпечені при проведенні експериментального дослідження

Сумарна товщина матеріалу, мм / питома вага, кг/м ²		Наповнювач (проміжний шар сендвіч-конструкції), товщина, мм			
		0	20 – тип А	40 – тип В	60 – тип С
Товщина базового ламінату, мм	2	4 / 5,96	24 / 8,86	44 / 11,76	64 / 14,66
	4	8 / 11,92	28 / 14,82	48 / 17,72	68 / 20,62
	8	16 / 23,84	36 / 26,74	56 / 29,64	76 / 32,54

Результати дослідження

Основним параметром, за яким здійснюється вибір оптимальної конфігурації захисного матеріалу, є співвідношення енергопоглинаючих властивостей до ваги виготовленої захисної конструкції. Додатковими перевагами сендвіч-конструкцій є також тепло- та звукоізоляційні властивості. Типова сендвіч-конструкція складається з двох зовнішніх шарів більшої механічної міцності і проміжного зазвичай пористого наповнювача, причому шар наповнювача має порівняно більшу товщину, ніж товщина кожного з крайових шарів, що коливається по величині в залежності від конкретного типу матеріалу.

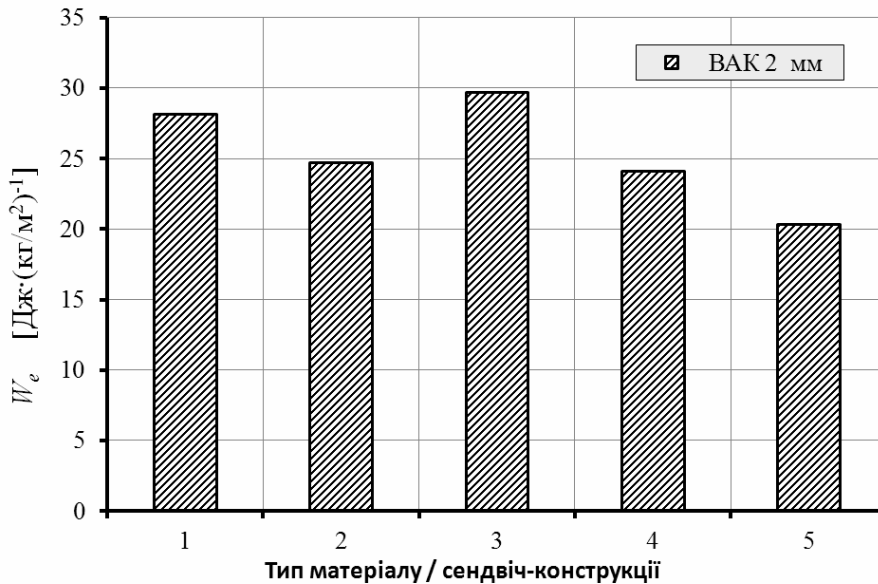


Рисунок 2 – Питома енергія, поглинена захисною конструкцією

1 – одиничний шар матеріалу; 2 – шар матеріалу подвоєної товщини; 3, 4, 5 – сендвіч-панель типу А, В, С відповідно

Жорсткість такої конструкції при згині досягається за рахунок того, що максимальні напруження розтягненням і стисканням припадають саме на більш міцні шари, рознесені один відносно одного на певну відстань і віддалених від нейтральної осі, що лежить в межах внутрішнього менш міцного шару, який забезпечує низьку питому вагу конструкції і відіграє роль зв'язуючого двох інших шарів. Залежно від наповнювача можна досягти більш високих показників сендвіч-панелі щодо здатності пропускати звукові хвилі і передавати тепло.

Результати експериментального визначення енергії, поглиненої конструкцією на основі волоконноармованого композиту (ВАК), і приведені до одиниці погонної ваги матеріалу, приведені на рисунку 2. Як видно із результатів досліджень, запропонована сендвіч-конструкція характеризується підвищеними властивостями енергопоглинання навіть при врахуванні додаткової ваги пінистого наповнювача. Додаткове потовщення проміжного шару сендвіч-конструкції не призводить до суттєвого підвищення енергопоглинання, проте супроводжується зростанням ваги конструкції. В результаті спостерігається зниження показників питомого енергопоглинання при збільшенні товщини проміжного шару. Для досліджених варіантів конструкції оптимальною виявилась комбінація ВАК товщиною 2 мм із проміжним шаром товщиною 20 мм.

З метою оцінки характеристик енергопоглинання сендвіч-конструкцій на основі ВАК та традиційних металевих сендвіч-панелей було проведено дослідження тришарових плит із проміжним пористим наповнювачем на основі поліпропілену та несівними шарами із пластин алюмінію товщиною 1 мм та 2 мм. На рис. 3 приведені порівняльні дані поглинутої захисною конструкцією енергії. Сендвіч-панелі на основі ВАК забезпечують порівняно

високі значення поглиненої енергії і однозначно виграють по питомому енергопоглинання за умови перерахунку на вагу конструкції.

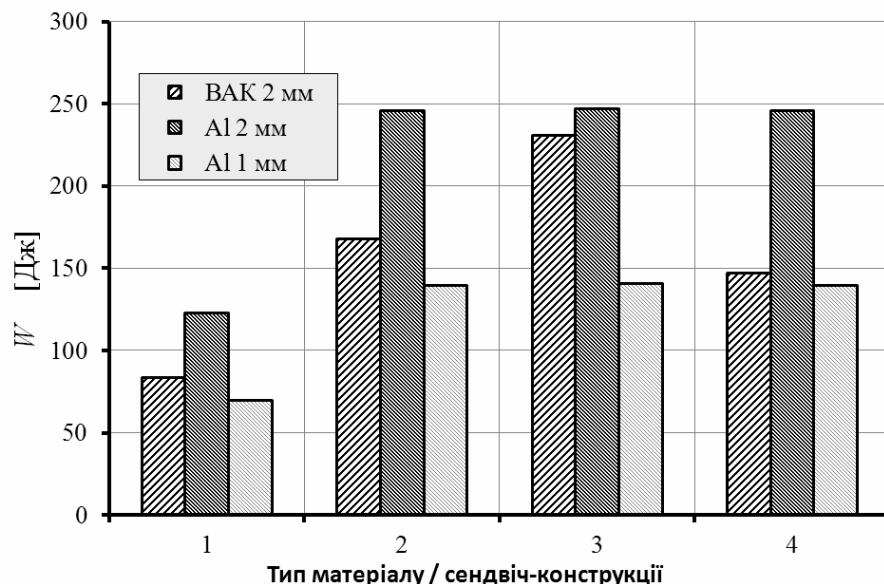


Рисунок 3 – Поглинена захисною конструкцією енергія

1 – одиничний шар матеріалу; 2 – двошарова конструкція; 3 – сендвіч-панель типу А; 4 – шар матеріалу подвоєної товщини

Ідеологія отримання підвищених показників поглинання енергії захисною сендвіч-конструкцією полягає в наступному. Розсіювання енергії в зразку відбувається кількома шляхами. З одного боку, механічна енергія взаємодії переходить в тепло при деформаційних процесах. Таким чином, коливання системи, в т.ч. акустичні, супроводжуються її розсіюванням. З іншого боку, енергія витрачається на розрив зв'язків між частинками матеріалу з утворенням збуджених поверхонь [11]. Якщо мова йде про розрив зв'язків на молекулярному рівні, тобто тих слабких взаємодій, які відіграють істотну роль при затвердінні довгомoleкулярних полімерів, енергія поглинається молекулами при розриві зв'язку та вивільняється знову в разі утворення нового зв'язку. Проте ймовірність відновлення зв'язків в загальному випадку падає при зростанні швидкості взаємодії [12]. Таким чином, підвищене енергопоглинання відбувається за рахунок розсіювання енергії при утворенні пошкоджень.

З метою реалізації підвищених властивостей енергопоглинання і можливості оптимізації структури матеріалу для роботи в передбачуваних в експлуатації умовах, в даному випадку таких, як середня швидкість очікуваного удару і геометрія ударника, було проведено чисельне моделювання удару сендвіч-конструкцій на основі ВАК. Модель ділянки такої конструкції, виконана в скінченноелементному програмному комплексі, а також варіанти розташування шарів, представлена на рисунок 4.

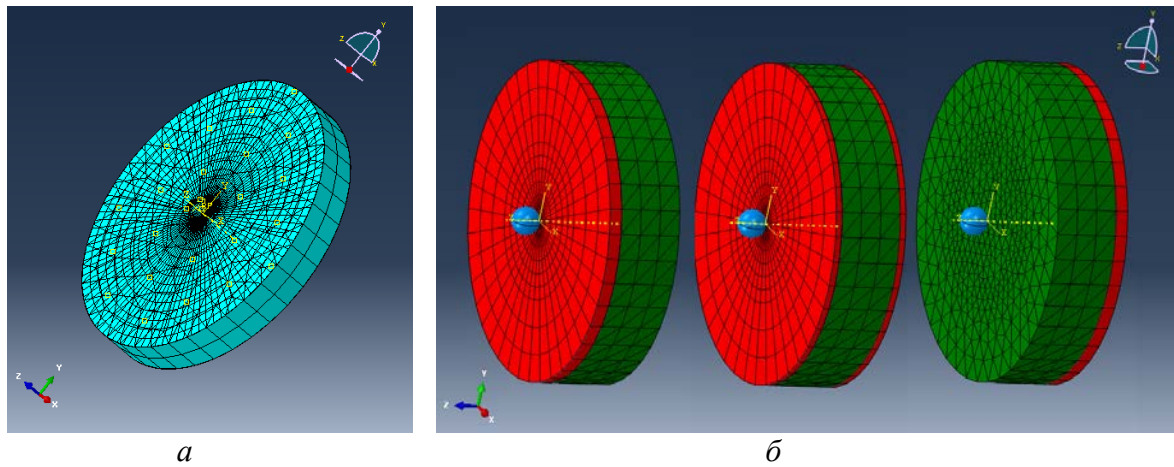


Рисунок 4 – Скінченноелементна модель ділянки сендвіч-конструкції (а) та варіанти розташування шарів (б)

У вигляді користувацької процедури в схему розрахунку була впроваджена залежність енергопоглинання від ймовірного розрахункового параметру взаємодії на основі підходу, представленого в [13]. На рисунку 5 приведена діаграма розрахункових величин поглиненої різними варіантами розглянутої конструкції енергії.

Відхилення розрахованих величин сприйнятої зразком конструкції енергії E_a по відношенню до експериментально отриманих даних не перевищувало для всіх досліджених швидкостей величини 10% у випадку застосування ймовірного підходу [13]. Для стандартної моделі ця величина набувала більших значень (наближалася до 40% при критичних швидкостях пробивання).

Таким чином, з діаграми видно, що за результатами розрахунку, як і у відповідності до експериментальних даних, застосування вдвічі більшої товщини композиту дає меншу вигоду стосовно енергопоглинання матеріалу, ніж застосування двох більш тонких шарів з проміжним додатковим шаром за умови роботи конструкції в певному діапазоні швидкостей удару, що характеризується підвищеним енергопоглинанням заданого типу матеріалу.

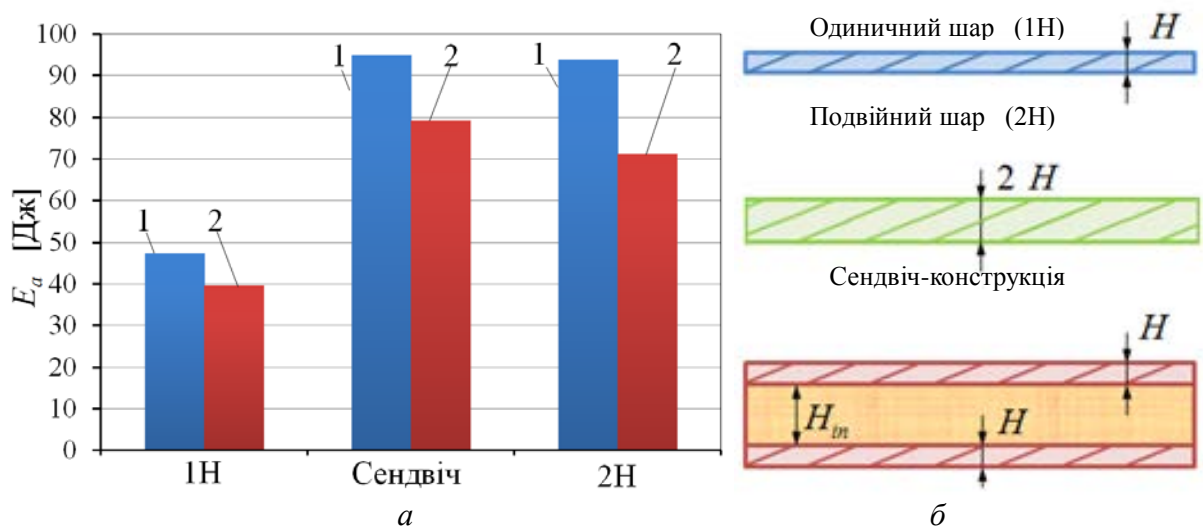


Рисунок 5 – Розрахункові величини поглиненої енергії E_a (а) та будова захисних конструкцій (б)

1 – стандартна модель; 2 – розроблена модель

У зв'язку з висвітленими вище практичними проблемами, актуальним завданням є створення систем і конструкцій, що забезпечують підвищену ударну міцність. На основі проведених експериментальних і чисельних досліджень була розроблена система композитних захисних щитів для захисту особового складу пожежних команд та рятувальних спецпідрозділів (рисунок 6). Система щитів логічно доповнює системи індивідуального захисту, що включають каску і бронежилет, розкриваючи нові можливості проведення рятувальних операцій з підвищеною безпекою.



Рисунок 6 – Набір композитних захисних щитів для захисту особового складу пожежних команд та рятувальних спецпідрозділів

Особливістю конструкції захисних щитів було формування композитної конструкції щита на матриці-підкладці, яка залишалася елементом конструкції щита, надаючи йому зовнішній вигляд, практично не впливаючи на ударну міцність і вагові параметри конструкції. Однак, ця матриця-підкладка забезпечує чудові захисні властивості безпосередньо матеріалу Twintex. У конструкції щитів використовувалися матриці-підкладки відповідно з полікарбонату, поліуретану і штампованого металевих листа товщиною 0,35 мм.

Перевагами полікарбонатної і металевих матриці-підкладки є їх хороша здатність бути пофарбованими в різні кольори, що дає можливість створювати на базі типових конструкцій захисні щити для пожежних команд, які потребують фарбування конструкцій в червоний, червоно-білий або помаранчевий кольори.

Найбільш стійкі до подряпин і зовнішніх дефектів щити з поліуретановою матрицею-підкладкою. У зв'язку з тим, що деякі фарби частково розчиняють полікарбонат, це сприяє створенню монолітної з полікарбонатною основою плівки. На таких щитах менше видно подряпини в порівнянні зі щитами з металевих підкладкою, однак захисні властивості металевих матриці-підкладки до невеликих ударів вище. Будучи більш пластичним матеріалом, вона поглинає енергію удару за рахунок утворення незворотних деформацій без утворення тріщин і втрати функціональності щита як цілого. Крім того, незважаючи на те, що від точкових легких ударів залишаються вм'ятини залишкової деформації, розтріскування декоративного захисного шару, як на конструкції з полікарбонатною матрицею-підкладкою, не спостерігається.

Особливістю матеріалу конструкції розроблених захисних щитів було використання в якості зв'язуючого матеріалу додатково хлорованого поліпропілену російсько-українського виробництва. Структурований поліпропілен виробництва Волгоградського хімічного заводу

(Росія) протягом сорока годин піддавався хлоруванню при температурі $T = 150...155^{\circ}\text{C}$ і тиску $P = 2$ МПа, що відповідає $P = 20$ атм, у присутності нікелевого каталізатора і парів суміші органічних розчинників, в основі яких лежить сольвент, в реакторах експериментального виробництва фірми «ВІРАЖ ЛП» (м. Київ, Україна).

На рисунку 6, б показаний варіант використання захисного щита для захисту бійця пожежної команди під час перебування в зоні можливого вибуху палаючих об'єктів, а на фото рисунку 6, а – додатковий захист кабіни водія при знаходженні спецтехніки безпосередньо в районі пожежі.

Введення в структуру полімеру хлору, практично не змінюючи фізичних властивостей матеріалу, дозволяє частково розчиняти його в розчинах на базі суміші сольвенту і толуолу і формувати конструкцію щита без потужного прес-обладнання і нагріву. Формування проходило в матриці-підкладці при тиску $P = 10$ атм, що забезпечувалося еластичними гумовими балонами. Особливістю конструкції щитів було введення в структуру композита, а саме в середній шар конструкції, додаткового шару вуглецевого волокна. Склотканину сатинового плетіння перед формуванням додатково знежирюють. Парафін видалявся випалюванням нагріванням газовими пальниками до відсутності димоутворення склотканини.

Захисні щити додатково по краю окантовані П-подібною гумовою смугою, що додатково захищає зовнішню полікарбонатну кромку. Захисна сендвіч-структура додатково окантована П-подібним металевим профілем. Така конструкція знижує захисну зону щита з 1570×500 мм до 1520×450 мм, проте в реальних експлуатаційних умовах дозволяє складати щити в захисні конструкції, що покращує їх експлуатаційні характеристики. Всі щити забезпечені системами кріплення, які дозволяють створювати з них захисні конструкції, а також знімними трубчастими ручками, що виключають вибивання з рук щита при попаданні в нього високошвидкісних об'єктів. Розроблені конструкції щитів випробувані в реальних експлуатаційних умовах і показали високі захисні якості.

Висновки

Проведені експериментальні дослідження волоконнозміцнених композитів та сендвіч-панелей на їх основі, що можуть застосовуватись в якості матеріалу захисних конструкцій щитів та спецобладнання пожежних і рятувальних команд. Встановлені оптимальні параметри сендвіч-матеріалу з точки зору підвищення властивостей енергопоглинання при ударі в передбачуваному діапазоні швидкостей взаємодії, що відповідає критичним енергіям пошкодження волоконнозміцненого матеріалу. Запропоновані конструкції можуть знайти широке застосування в галузі захисту транспортних засобів та споруд.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. M. Held, "Today's Standardized Survivability Tests," Defense Industries: Science and Technology Related to Security: Impact of Conventional Munitions on Environment and Population, NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences вид., P. Branco, H. Schubert, J. Campos, ред.: Springer Netherlands, 2004, т. 44, с. 239-254.
2. D.P. Nolan, Explosion and Fire Resistance Ratings, Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles, 2-е вид. Oxford: William Andrew Publishing, 2011.
3. T.J. Shields, "Fire Safety Engineering Research and Technology Centre (FireSERT) University of Ulster: Recent Developments," Fire Technology, т. 39, № 3, с. 275-284, 2003.
4. STANAG 4240(2). Liquid Fuel / External Fire, Munition Test Procedures, 2003.
5. National Institute of Technology Standard, NIJ Standard 0101.06 Ballistic Resistance of Body Armor., July, 2008.
6. EN 1063:2000 Security glazing. Testing and classification of resistance against bullet attack.

7. Ballistic Resistant Protective Materials - NIJ Standard 0108.01, NCJ 099859, September 1985, NIJ Standard, by Law Enforcement Standards Laboratory of the National Bureau of Standards.
8. T.L. Boggs, Ch.W. Dickinson, L.M. Barrington, C. Belanger, P.J. Haskins, "Hazards of Energetic Materials and their Relation to Munition Survivability," AGARD-CP-511 Conference Proceedings, Bonn, Germany, 21-23.10.1991, с. 16.1-16.7.
9. Plastics -- Determination of puncture impact behaviour of rigid plastics -- Part 1: Non-instrumented impact testing.
10. DIN 65561: 1991. Aerospace; fibre reinforced plastics; testing of multidirectional laminates; determination of compressive strength after impact test.
11. В.Т. Трощенко, ред., Прочность материалов и конструкций, 2-е вид. Киев: Академперіодика, 2006.
12. V.V. Astanin, G.O. Shchegel, W. Hufenbach, A. Hornig, A. Langkamp, "Characterising failure in textile-reinforced thermoplastic composites by electromagnetic emission measurements under medium and high velocity impact loading," International Journal of Impact Engineering, т. 49, с. 22-30, 2012.
13. V.V. Astanin, G.O. Shchegel, "Impact deformation and fracture of hybrid composite materials," Strength of Materials, т. 43, № 6, с. 615-627, 2011.

