

ОСОБЛИВОСТІ УДАРНОГО ПОШКОДЖЕННЯ ТЕКСТИЛЬНОЗМІЦНЕНИХ КОМПОЗИТИВ ПРИ ВИСОКИХ І НИЗЬКИХ ШВИДКОСТЯХ УДАРУ

Проведено порівняльний аналіз експериментальних і розрахункових даних щодо пошкодження текстильнозміцнених композиційних матеріалів в результаті дії високо- і низькошвидкісного удару при незмінному рівні початкової кінетичної енергії ударника. Проаналізовано особливості пошкодження, здійснено спробу їх пояснення з точки зору запропонованої раніше моделі пошкодження багатокomпонентних композиційних матеріалів при ударному навантаженні в широкому діапазоні швидкостей на основі ймовірного підходу до аналізу руйнування і відновлення зв'язків між структурними елементами матеріалу.

Ключові слова: текстильнозміцнені композити; ударна міцність; МСЕ; механіка пошкодження; ймовірна модель пошкодження.

Вступ і постановка задачі

Текстильнозміцнені композиційні матеріали являють собою клас волоконнозміцнених композиційних матеріалів, який добре зарекомендував себе і є перспективним у створенні легких конструкцій. Вони мають широкі можливості по адаптації структури матеріалу, в т. ч. типу плетіння, для найкращого сприйняття навантаження у всіх напрямках у площині ламінату. Крім того, завдяки високим показникам міцності і якості перерозподілу навантаження за рахунок використання текстильного плетіння, ці матеріали також добре сприймають ударне навантаження, зокрема, докладене поза площиною ламінату.

Раніше авторами [1–3] було проведено детальне дослідження поведінки текстильної зміцнених композиційних матеріалів на основі скловолкна і поліпропіленової матриці при високих (до 1500 м/с) швидкостях удару. Знання властивостей і особливостей поведінки зазначених матеріалів у такому широкому діапазоні швидкостей взаємодії є особливо важливим для їх обґрунтованого застосування у сфері наземного та авіаційного транспорту, при створенні легких захисних конструкцій. Була розроблена феноменологічна модель [1, 4–5], яка дозволяє передбачати поведінку, в тому числі поглинання матеріалом енергії удару, а значить, його захисні властивості, з високим ступенем точності для високих швидкостей удару.

Як відомо, однакова енергія удару може бути досягнута як при зіткненнях з масивним, але низькошвидкісним, так і з легким, але розігнаним до

високої швидкості стороннім предметом або перешкодою. Часто при зіткненні транспортних засобів має місце взаємодія з відносно низькими швидкостями удару, проте, з великогабаритними елементами великої маси. Важливо мати уявлення про вплив саме співвідношення швидкості і маси на властивості енергопоглинання ламінованого текстильнозміцненого матеріалу.

Метою даного дослідження стала спроба пояснити особливості ударного по-пошкодження текстильнозміцнених композитів при низьких і високих швидкостях удару з погляду запропонованої раніше в [1] і розвиненої в [4–5] моделі пошкодження багатокomпонентних композиційних матеріалів на основі ймовірного підходу до аналізу руйнування і відновлення зв'язків між структурними елементами матеріалу.

Стан досліджень

Типовими умовами виникнення низькошвидкісного удару є, наприклад, бетонні або сталеві уламки, утворені в результаті швидкого розвантаження і відбиття хвиль стиску від вільних поверхонь у будівлях, побудованих з попередньо напруженого бетону (до 100 м/с) [6], високошвидкісного удару – зіткнення із захопленими повітряно-газовими потоками двигунів камінням і піском при зльоті та посадці літаків, з вирваними лопатками турбін, водяними краплями, в тому числі тими, що конденсуються у потоці високонапірного пару і призводять до ерозії турбінних лопаток, частинками льоду (градом) і піску при зустрічі з високошвидкісними

літальними апаратами і космічними апаратами, що входять в атмосферу [7].

У багатьох роботах проводиться аналогія між статичним вдавлюванням індентора і низькошвидкісним ударом, або так званим динамічним вдавлюванням, тим не менше, швидкість ударника при динамічному вдавлюванні поступово зменшується в результаті поглинання кінетичної енергії зразком матеріалу [8]. Основними видами статичних випробувань є випробування при постійній швидкості навантаження, постійній швидкості деформації або постійній силі навантаження. У кожному випадку при статичному вдавлюванні здійснюється безперервний підвід енергії від силового приводу випробувальної установки. Контактна сила взаємодії в обох випадках визначається масою і швидкістю індентора або ударника. Отже, у разі статички можна отримати пошкодження зразків подібного характеру лише при підборі швидкості удару таким чином, щоб розрахункове максимальне значення сили удару відповідало максимальній силі при статичному вдавлюванні [8]. Однак, закон і умови її розподілу в часі при статичних випробуваннях будуть принципово відрізнятися від таких при високошвидкісному та низькошвидкісному ударі [9]. Застосування квазістатичного підходу можливе лише у випадку багатократного перевищення масою ударника маси навантажуваної конструкції, коли останню можна знехтувати [10].

Випробування при низьких швидкостях удару падаючим вантажем за рахунок варіювання маси ударника, принаймні при двох різних значеннях маси ударника, представлені в роботах [11–14]. Такий метод випробувань рекомендується також у [15].

Варіювання енергії шляхом зміни висоти падіння вантажу застосовується набагато частіше [16]. У роботах проводиться аналіз впливу залежної від швидкості енергії удару на пошкодження зразка.

Аналіз згаданих досліджень дозволяє зробити висновок про те, що високі значення імпульсу при низькій енергії (маса значна, швидкість мала) супроводжуються загальною реакцією зразка, низькі значення імпульсу при високій енергії (маса мала, швидкість значна) – більш локалізованою взаємодією [17].

Матеріали і методи

Досліджувані в даній статті композиційні матеріали на основі поліпропіленової матриці і скловолокон характеризуються пружною поведінкою до руйнування [18–22]. Нелінійності залежності напружень від деформацій виникають як наслідок формування пошкодження [23].

В якості досліджуваного матеріалу був обраний перспективний з точки зору широкого використання у транспортній техніці представник волоконно-

міцнених композитів на основі скловолоконної тканини полотняного плетіння з умовно нескінченних волокон і термопластичної матриці. Матеріал волокна Е-скло, матеріал матриці поліпропілен. Вміст волокна за об'ємом ζ_v складає 35–40 %, співвідношення кількості волокон утка і основи 1:1, товщина волокон 1200 текс, композиція ламінату – симетрична укладка шарів [0/90]₈. Технологія виготовлення – гаряче пресування гібридоволоконного препрегу.

Основні статичні та загальнофізичні параметри матеріалу були визначені експериментальним шляхом і доповнені даними [18–19, 22, 24].

Розглядалася задача прямого центрального удару виготовленої з досліджуваного матеріалу композиційної перешкоди, яка представляє собою випробуваний зразок, зі сферичним ударником або ударником зі сферичною носовою частиною, як показано на наведеній принциповій схемі (рис. 1). Ударник виконаний із сталі ШХ15СГ і у всіх дослідках не мав залишкових деформацій або пошкоджень, а для дослідженого діапазону умов досліду вважався абсолютно жорстким тілом.

Випробування були розділені на дві характерні групи, а саме випробування при порівняно високих швидкостях удару ($v_0 = 20 \dots 200$ м/с), але малій масі ударника (випробування групи А), а також випробування при порівняно низьких швидкостях удару (v_0 до 6 м/с), але при великій масі ударника (випробування групи В), причому параметри взаємодії підбиралися таким чином, щоб початкова енергія удару в обох групах була однаковою.

Ударна взаємодія при високих швидкостях здійснювалася шляхом розгону ударника малої маси $m_A = 2,7 \cdot 10^{-3}$ кг, діаметром $d_A = 8,75 \cdot 10^{-3}$ м за допомогою термогазобалістичної прискорювальної установки у складі раніше розробленого і описаного в [1–2, 25] експериментального комплексу для вивчення процесів ударної взаємодії в широкому діапазоні швидкостей «aSTanin» («Acceleration System for Testing of Antidamage Innovations»), який дозволяє реєстрацію процесів перерозподілу енергії ударника і зразка матеріалу, а також реєстрацію акустичної та електромагнітної емісії, яка, як було встановлено в [1, 26], супроводжує явища високошвидкісного удару складних композиційних матеріалів досліджуваного типу.

Умови взаємодії при випробуваннях на великій швидкості наближаються до рекомендованих стандартами [27–28], проте істотно розширена і вдосконалена номенклатура засобів і методів вимірювання параметрів удару. Випробування при низьких швидкостях ударником великої маси $m_B = 3$ кг реалізовані у відповідності до [29], але також з використанням додаткового вимірювального обладнання.

Особливостями установки для випробувань при низьких швидкостях ударниками великої маси

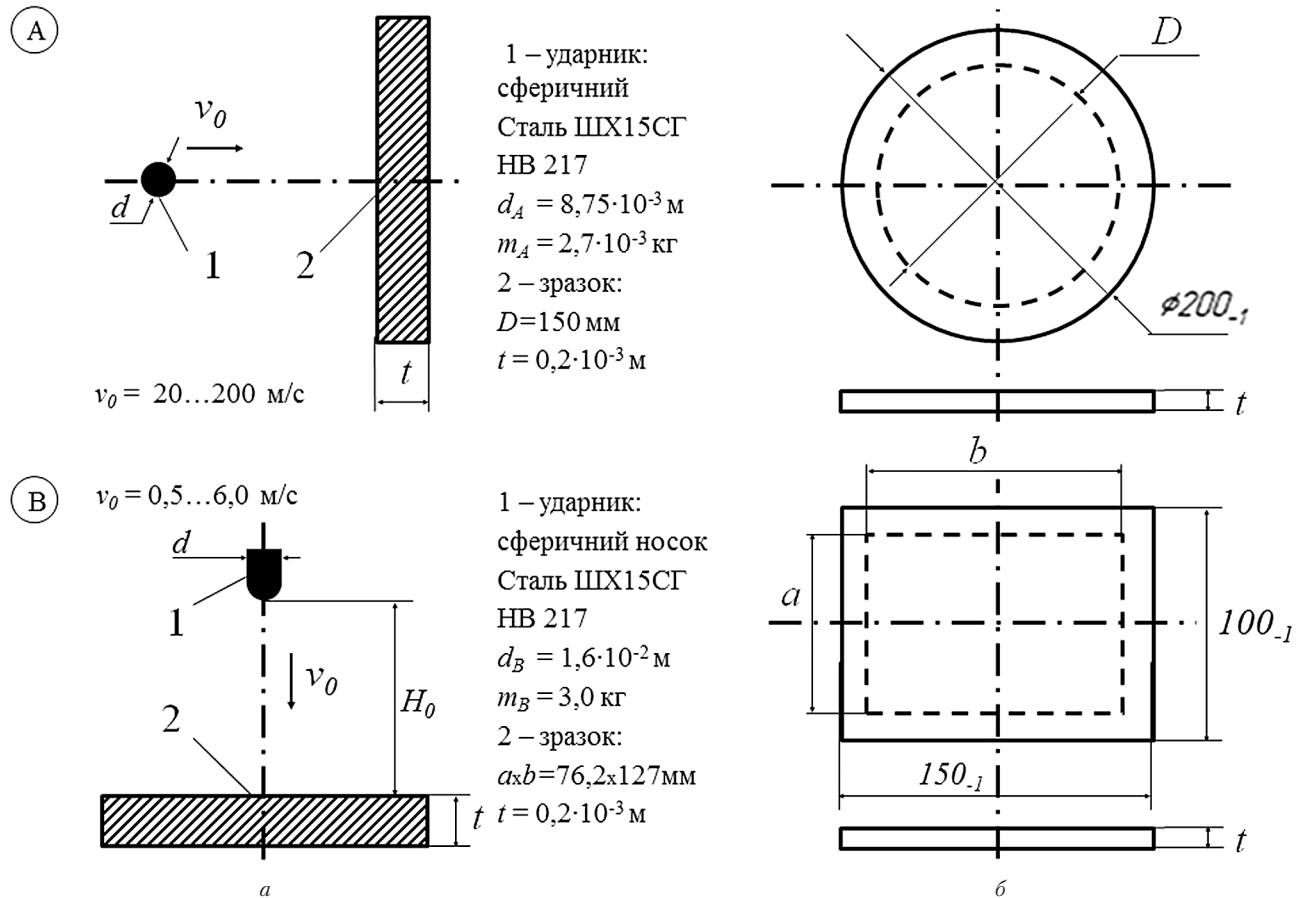


Рис. 1. Принципова схема дослідів (а) і схема випробуваного зразка (б) у випробуваннях групи А (вгорі) і групи В (внизу): a, b, D – розміри зразків, t – товщина зразків, d – діаметр ударника, H_0 – висота падіння ударника, праворуч пунктиром позначено край робочої області зразка, зовні від якого розташована позначена білим затиснена область зразка

полягають у наступному. У разі відскоку ударника після удару зі зразком відсутність додаткових пошкоджень внаслідок повторного удару при подальшому падінні ударника забезпечується спеціально розробленою механооптичною системою запобігання повторного зіткнення. Фотодатчики фіксують наявність зворотного переміщення ударника знизу вгору і система управління ініціює спрацювання додаткового захвату ударника, який фіксує його у верхньому положенні після відскоку. З метою забезпечення надійності роботи захоплення ударника спрацювання електронної системи дублюється механічним затискачем, який додатково запобігає повторній взаємодії ударника зі зразком. Кріплення зразка матеріалу здійснюється затисненням по краю прямокутної області розміром $76,2 \times 127 \text{ мм}$ при загальних розмірах зразка $100 \times 150 \text{ мм}$. Носова частина ударника – півсфера, як і у випадку високошвидкісних випробувань.

Важливою частиною випробувального комплексу є спеціально розроблена система контролю і управління температурою і параметрами навколишнього середовища, яка автоматично контролює тепловий режим проведення випробувань. При виконанні дослідів дотримувалися вимоги сталості

параметрів навколишнього середовища: температура $T = 23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, тиск $P = 10^5 \text{ Па} \pm 2\%$, вологість $\zeta = 50 \pm 10\%$ згідно вимог [29] по кліматичним умовам DIN EN ISO 129:2008 23/50-2 проведення випробувань у країнах з нетропічним кліматом, клас 2 [30], а також рекомендаціями [31].

Аналіз залишкових пошкоджень проводився за допомогою установки ультразвукового сканування HFUS-2400 AirTech, у комплексі зі спеціально розробленим програмним забезпеченням для аналізу сканованих знімків, а також за допомогою оригінального розробленого і виготовленого мобільного приладу для визначення поверхневих пошкоджень DS-1600 MD. Принципова схема роботи сканера поверхневих пошкоджень приведена на рис. 2.

Блоком підсвітки 1 здійснюється освітлення поверхні зразка 2 під різними кутами нахилу (рис. 2, а, б) і в різному частотному діапазоні. Інтенсивність відбитого світла в прив'язці до координат досліджуваної поверхні, реєстрована блоком 3, дозволяє визначити нерівномірність шорсткості поверхні зразка, в тому числі викликану пошкодженням. Порівняння пошкодженої поверхні з непошкодженою поверхнею типового зразка дозволяє програмному забезпеченню визначити зону пошкодження. Особли-

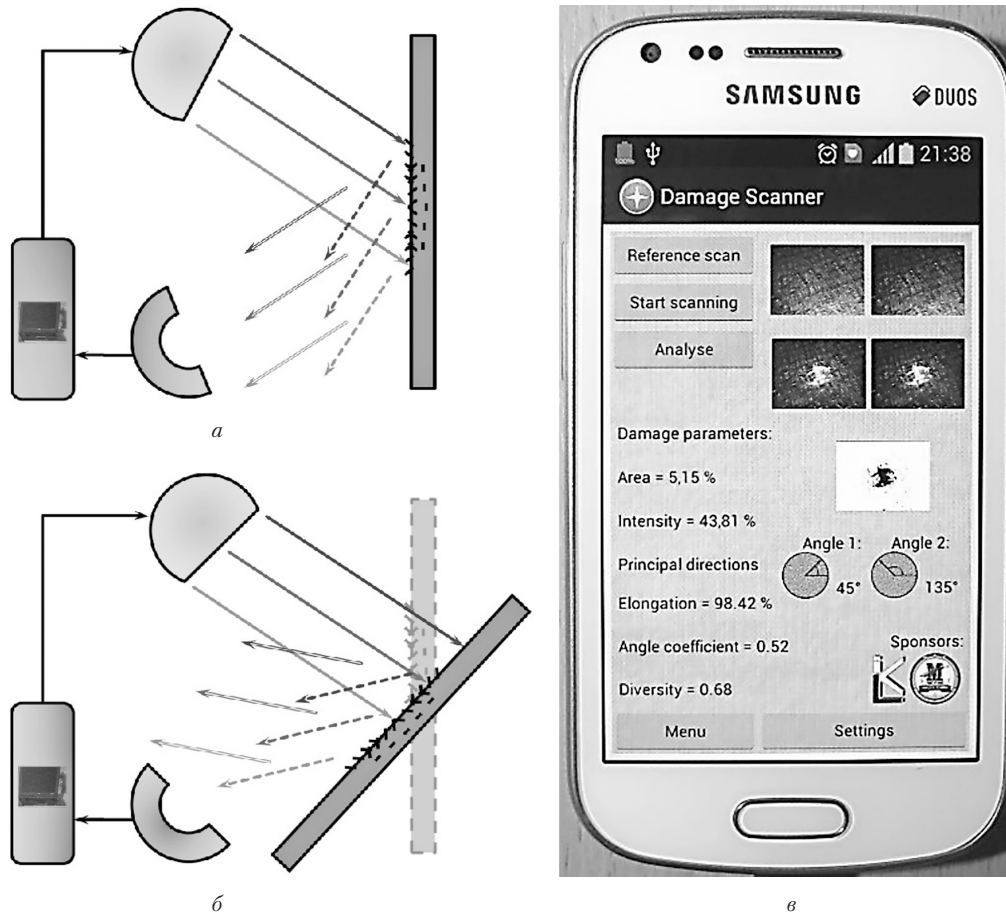


Рис. 2. Принципова схема роботи сканера поверхневих пошкоджень DS-1600 MD (а, б) і робоче вікно програми для управління сканером під управлінням операційної системи Android (в)

вістю даного принципу досліджень є те, що стає можливим виявити саме такі, що залишаються непомітними при використанні інших методів дослідження, наприклад, ультразвукового сканування, малі приповерхневі розриви волокон, що мають місце внаслідок взаємодії ударної хвилі і хвиль напруження з границею матеріалу. Як показує досвід, пошкодження такого типу реєструється на відстанях від епіцентру удару, які значно перевищують розміри основного ударного кратеру. Наявність такого типу пошкодження біля поверхні вказує на присутність у більш глибоких шарах матеріалу малих дельтамінаційних пошкоджень.

Прилад дозволяє здійснювати експрес-аналіз пошкодження за допомогою компактного блоку сканування, що підключається до стандартного мобільного пристрою під управлінням операційної системи Android.

Порівняння результатів експерименту і моделювання

З умови рівності енергії удару при низькій і високій швидкості взаємодії діапазон лінійних швидкостей ударника низької маси m_A був обмежений діапазоном від 20 до 200 м/с, а ударника висо-

кої маси m_B — діапазоном до 6 м/с. Детально умови експерименту наведені в табл. 1.

На рис. 3 наведені фотографії пошкодженої області зразків після проведених досліджень, а також відповідні експериментальні результати ультразвукового (рис. 3, а, б) і оптичного (рис. 3, в, г) сканування.

Моделювання пошкодження базується на розгляді залежностей ймовірностей руйнування p_f і відновлення p_r зв'язків у матеріалі на мікро- і макро-структурному рівні в залежності від різних параметрів, таких як відносна деформація ϵ , швидкість деформації $\dot{\epsilon}$, температура T та ін.

Нехай руйнування відбувається в експерименті при певній постійній швидкості деформації $\dot{\epsilon}_{ref}$ у момент досягнення величини відносної деформації ϵ_0 (ймовірність руйнування p_f починає перевершувати ймовірність відновлення p_r зв'язків), якому відповідає границя міцності матеріалу, позначимо її як $\sigma_{max} = R$.

Так як швидкість деформації вважається в експерименті незмінною $\dot{\epsilon}_{ref} = const$, то питома за часом ймовірність $p_\epsilon = const$, а повна ймовірність $p_d(\dot{\epsilon})$ в певний розглянутий момент часу t характеризується яким-небудь певним значенням k , тобто $p_d(\dot{\epsilon}) = k$. Час досягнення границі міцності t_0 і теоретичний час t_c досягнення критичної величини відносної

Умови експерименту

№ п/п	Параметр	Позначення	Од. вим.	Дослід							
				1	2	3	4	5	6	7	8
1.	№ умов дослідів п/п	–	–	1	2	3	4	5	6	7	8
2.	Енергія удару	E_0	Дж	0,54	3,38	8,64	13,5	19,44	30,38	43,74	54
3.	Швидкість ударника при масі m_A	v_{0A}	м/с	20	50	80	100	120	150	180	200
4.	Швидкість ударника при масі m_B	v_{0B}	м/с	0,6	1,5	2,4	3	3,6	4,5	5,4	6
5.	Висота падіння ударника масою m_B	H_0	м	0,018	0,115	0,294	0,459	0,661	1,032	1,486	1,835

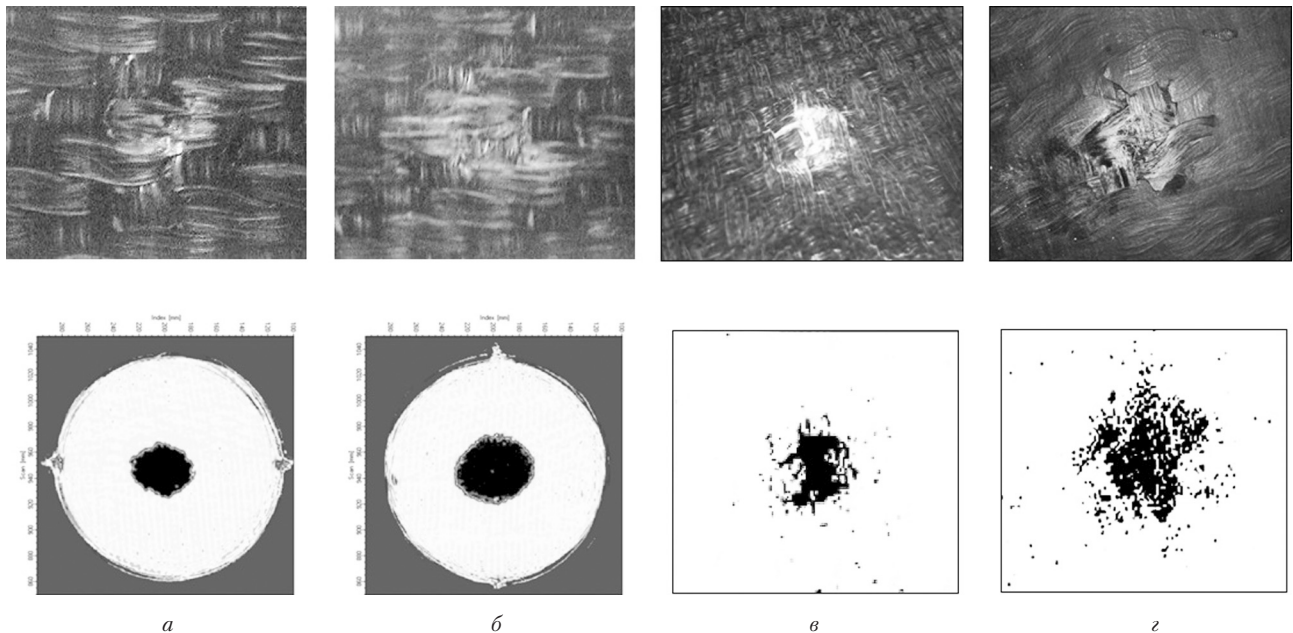


Рис. 3. Фотографії (зверху) і результати сканування (знизу) пошкодженої області зразків при ударі зі швидкостями 80 м/с (а), 180 м/с (б), 2,4 м/с (в), 5,4 м/с (г)

деформації, при якій імовірність $p_d(\epsilon) = p_\epsilon = 1$ практично дорівнює одиниці, рівні відповідно:

$$t_0 = \frac{\epsilon_0}{\dot{\epsilon}_{ref}}, t_c = \frac{\epsilon_c}{\dot{\epsilon}_{ref}}. \quad (1)$$

Таким чином,

$$\begin{cases} p_d(\dot{\epsilon})|_t = \int_0^t p_\epsilon dt = p_\epsilon \cdot \Delta t \Rightarrow p_\epsilon = \frac{k}{t}, \\ p_d(\dot{\epsilon})|_t \equiv k \end{cases} \quad (2)$$

де $\Delta t = t - 0$.

Визначений у такому експерименті коефіцієнт пропорційності між напруженнями і деформаціями при $0 \leq t \leq t_0$, якщо знехтувати нелінійністю залежності внаслідок пошкодження, що є результатом зміни відстані між зв'язаними структурними елементами (якому відповідає імовірність p_ϵ),

$$E_{ref} = E_0 \cdot \left(1 - \int_0^t p_\epsilon dt\right) = E_0 \cdot (1 - \Delta t \cdot p_\epsilon). \quad (3)$$

де $E_0 = n_i \cdot f_i$ – коефіцієнт пропорційності між напруженнями і деформаціями без урахування пошкодження внаслідок проведення експерименту

при певній швидкості деформації $\dot{\epsilon}_{ref}$, тобто умовно істинний квазістатичний модуль пружності без урахування будь-яких пошкоджень матеріалу.

Розглянемо тепер аналогічні випробування, але які проводяться при відносній швидкості деформації $\dot{\epsilon}'$. Якщо в першому випадку в момент часу t була досягнута відносна деформація ϵ , то досягнення цієї ж величини відносної деформації ϵ у другому випадку вимагає вже часу t' (при $\dot{\epsilon}' > \dot{\epsilon}$ маємо $t' < t$), відповідні напруження будуть співвідноситися як:

$$\frac{\sigma|_{\epsilon, \dot{\epsilon}'}}{\sigma|_{\epsilon, \dot{\epsilon}_{ref}}} = \frac{E_0 \cdot \left(1 - \int_0^{t'} p_{\dot{\epsilon}'} dt\right) \cdot \epsilon}{E_0 \cdot (1 - \Delta t \cdot p_{\dot{\epsilon}}) \cdot \epsilon} = K \cdot E_{ref}. \quad (4)$$

Найдемо коефіцієнт K , який дозволяє висловити напруження при змінній відносній швидкості деформації $\dot{\epsilon}'$, знаючи значення модуля пружності E_{ref} із референтних випробувань. Для цього розглянемо модуль пружності E' по аналогії з формулою (3):

$$E' = E_0 \cdot \left(1 - \int_0^{t'} p_{\dot{\epsilon}'} dt\right) = E_0 \cdot (1 - d_i) = E_{ref} \cdot (1 - d_{ir}), \quad (5)$$

так як $E_{ref} = E_0 \cdot (1 - d_{ref})$, де d_i – пошкодження в поточному експерименті, d_{ref} – пошкодження в референтному випадку, d_{ir} – пошкодження в поточному експерименті відносно референтного експерименту, але тоді

$$E' = E_0 \cdot (1 - d_i) = E_0 \cdot (1 - d_{ref}) \cdot (1 - d_{ir}), \quad (6)$$

відповідно,

$$d_{ir} = \frac{d_i - d_{ref}}{1 - d_{ref}}. \quad (7)$$

Враховуємо (2) и нехтуємо різницею між $p_{\dot{\epsilon}'}$ і $p_{\dot{\epsilon}}$, тобто $p_{\dot{\epsilon}'} \approx p_{\dot{\epsilon}_{ref}}$, при умові малої різниці між $\dot{\epsilon}'$ і $\dot{\epsilon}_{ref}$, а також враховуємо, що референтний експеримент квазістатичний, а отже, величина $\dot{\epsilon}_{ref}$ досить мала, як і відповідне їй пошкодження d_{ref} , тому $1 - d_{ref} \approx 1$. Тоді отримуємо:

$$\begin{aligned} d_{ir} &\approx d_i - d_{ref} = \int_0^{t'} p_{\dot{\epsilon}} dt - \int_0^t p_{\dot{\epsilon}_{ref}} dt \approx \\ &\approx k \cdot \int_t^{t'} \frac{1}{t} dt = k \cdot \ln t|_t^{t'} = k \cdot \ln \frac{t'}{t} = \\ &= k \cdot \ln \frac{\epsilon}{\dot{\epsilon}'} \cdot \frac{\dot{\epsilon}_{ref}}{\epsilon} = k \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}_{ref}}{\dot{\epsilon}'}. \end{aligned} \quad (8)$$

Повертаючись до (5), отримуємо:

$$\begin{aligned} E' &= E_{ref} \cdot (1 - d_{ir}) = E_{ref} \cdot \left(1 - k \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}_{ref}}{\dot{\epsilon}'}\right) = \\ &= E_{ref} \cdot \left(1 + k \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}'}{\dot{\epsilon}_{ref}}\right), \end{aligned} \quad (9)$$

тобто запропонований нами теоретичний підхід дозволяє отримати в окремому випадку малої різниці між $\dot{\epsilon}'$ і $\dot{\epsilon}_{ref}$, формулу, експериментально встановлену для цього часткового випадку в [32].

Раніше модифікована форма запропонованої імовірнісної моделі матеріалу успішно застосовувалася для моделювання волоконнозміцнених, а також розробленого нового типу сіткозміцнених удароміцних композиційних матеріалів [33–38].

Вирішальну роль у формуванні особливостей ударного пошкодження відіграє час взаємодії контактуючих тіл з урахуванням запасу механічної енергії кожного з них. На рис. 4 наведені дані по величинам експериментальних значень часу удар-

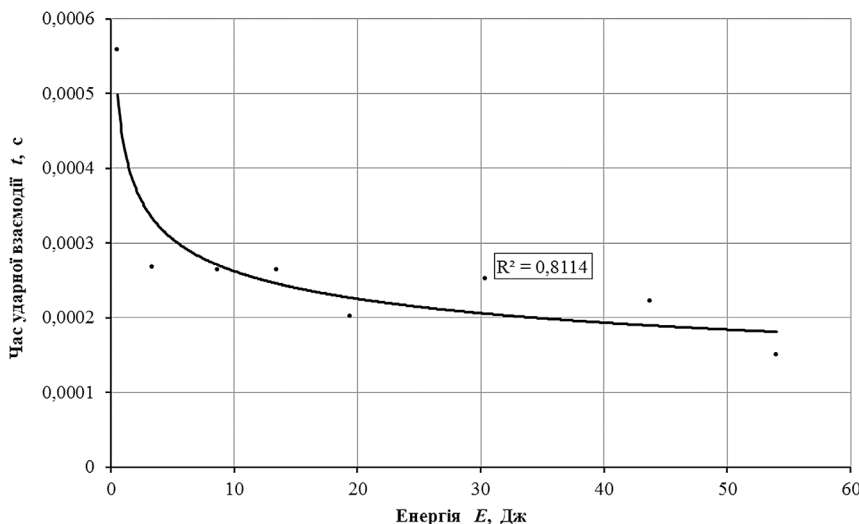


Рис. 4. Залежність часу ударної взаємодії від значень початкової енергії високошвидкісного удару

ної взаємодії, виміряного за осцилограмами акустичного та електромагнітного емісійного сигналів при високошвидкісному ударі, причому ці величини знайшли свою відповідність з розрахунковими результатами.

Результати чисельного моделювання із застосуванням розробленої ймовірнісної моделі наведені на рис. 5 для випадку високошвидкісного удару і рис. 6 для низькошвидкісного удару.

Відносне значення залишкової міцності S_{ir} вздовж волокон основи та в напрямку волокон утка розраховуються як максимальне можливе значення пошкодження (рівне одиниці) за винятком величини рівня пошкодження d_{ir} , досягнутого на поточний момент часу:

$$S_{ir} \Big|_{t=\tau_{i+1}} = 1 - d_{ir} \Big|_{t=\tau_i}, \quad (10)$$

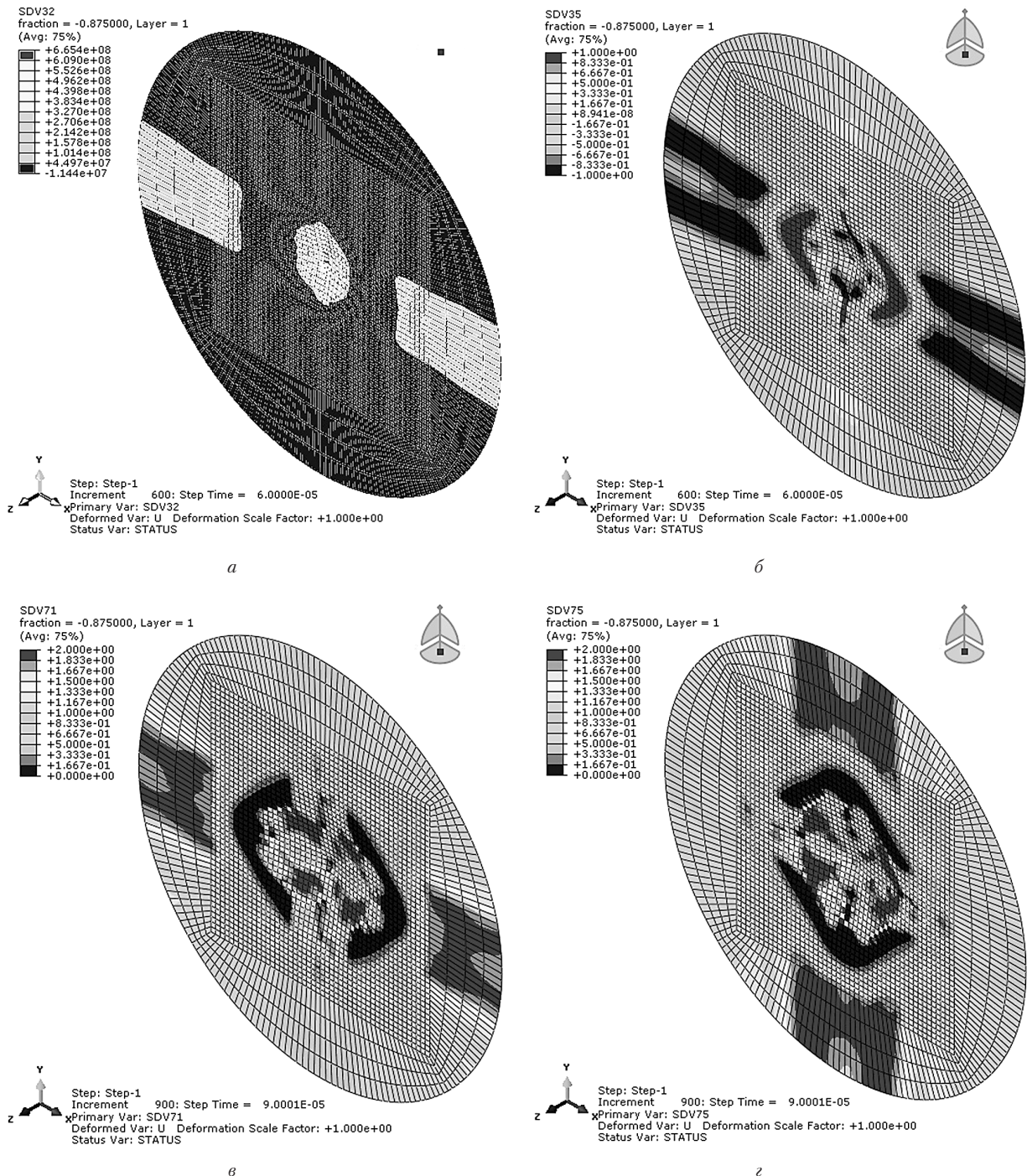


Рис. 5. Ізополя напружень у матеріалі вздовж волокон основи (а), параметра пошкодження вздовж волокон основи (б), відносного значення залишкової міцності вздовж волокон основи (в) і вздовж волокон утка (г) при ударі зі швидкостями 80 м/с (а), 120 м/с (б), 180 м/с (в, г)

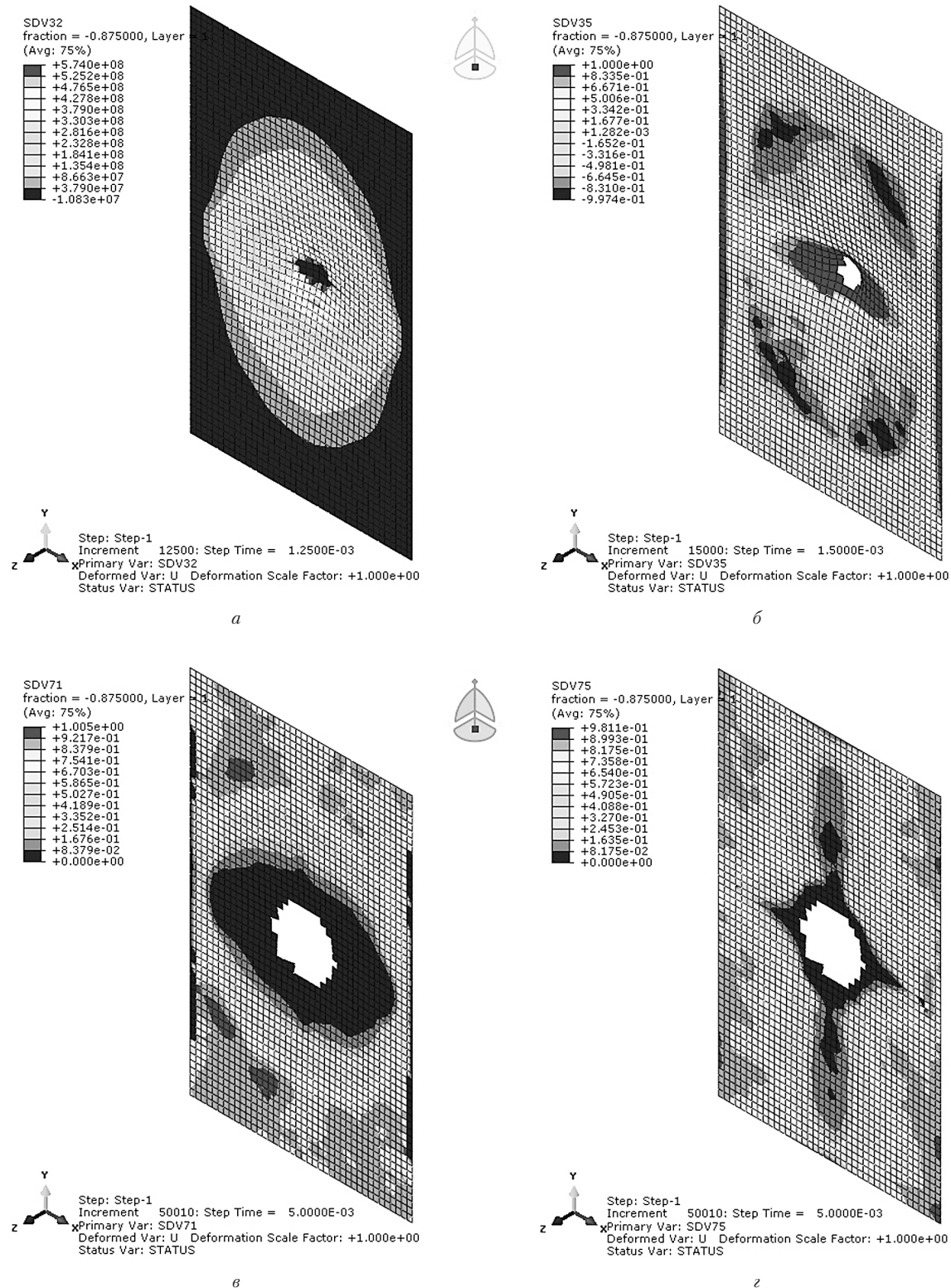


Рис. 6. Ізополі напружень у матеріалі вздовж волокон основи (а), параметра пошкодження вздовж волокон основи (б), відносного значення залишкової міцності вздовж волокон основи (в) і вздовж волокон утка (г) при ударі зі швидкостями 2,4 м/с (а), 3,6 (б), 5,4 м/с (в, г)

де t — час, τ_i та τ_{i+1} — попередній та поточний моменти часу.

Порівняння результатів моделювання високошвидкісного і низькошвидкісного удару показує знач-

но більшу локальну пошкодженість зразків при тому ж рівні енергії у разі низьких швидкостей ударника. Це знаходить пояснення з точки зору розробленої ймовірнісної моделі пошкодження матеріалу. При

низькій швидкості деформації ймовірність розриву зв'язків у матеріалі незначна, але в той же час при високій швидкості деформації не зруйновані протягом короткого часу взаємодії зв'язки дозволяють розподіл енергії удару по більш значному об'єму матеріалу зразка. Таким чином, можна очікувати наявності оптимуму захисних енергопоглинаючих характеристик при певних співвідношеннях маси і швидкості ударника при незмінній енергії, що залежить від того, чи перевищено балістичний ліміт зразка. Чисельне визначення таких характеристик можна здійснити як відсоток енергії удару, поглинений матеріалом, що розраховується як співвідношення різниці початкової і кінцевої енергії ударника до початкової його енергії у відсотках.

Встановлено механізм реалізації енергопоглинання, відповідно до якого за рахунок значно більш короткого часу взаємодії результуюче накопичене пошкодження (див. перше рівняння в (2) і результуюче рівняння (8), де розрахунок пошкодження здійснюється шляхом інтегрування за часом) до моменту вичерпання запасу початкової кінетичної енергії ударника виявляється істотно меншим. Зразок, таким чином, реагує як єдине непошкоджене ціле, енергія за рахунок взаємодії частинок матеріалу, зв'язки між якими не зруйновані, поширюється на більш значну площу зразка, питома енергія, що діє на одиницю об'єму і яка веде до його пошкодження, виявляється, таким чином, не настільки значною.

Висновки

Проведене дослідження впливу співвідношення маси і швидкості ударника на захисні властивості і енергопоглинання при ударі дозволило зробити наступні висновки.

Енергія пошкодження, що є частиною енергії удару, необоротно розсіяною в матеріалі в процесі пошкодження і руйнування, вище у випадку більш високих швидкостей, ніж у випадку більш високих мас ударника при тій же енергії удару. Поясненням даного явища служить те, що висока ймовірність руйнування зв'язків при більших швидкостях деформації обмежена параметром часу ударної взаємодії. Той же матеріал, таким чином, якщо енергія удару недостатня для наскрізного пробивання, менше пошкоджується і забезпечує більш високу залишкову енергію ударника при відскоці, тобто показує кращі ударозахисні властивості, у разі високошвидкісного удару.

Встановлено, що при енергіях удару, достатніх для наскрізного пробивання, зразки демонструють кращі захисні властивості у випадку низькошвидкісного удару на величину приблизно від 10 % до 15% в дослідженому діапазоні швидкостей і енергій ударника.

Література

- [1] Астанин В.В. Деформирование и разрушение гибридных композиционных материалов при ударе / В.В. Астанин, А.А. Щегель // Пробл. прочности. — 2011. — № 6. — с. 40-57.
- [2] Astanin V.V. Characterising failure in textile-reinforced thermoplastic composites by electromagnetic emission measurements under medium and high velocity impact loading / V.V. Astanin, G.O. Shchegel, W. Hufenbach, A. Hornig, A. Langkamp // Int. J. Impact Eng. — 2012. — vol. 49. — p. 22-30.
- [3] Shchegel G.O. Probabilistic damage modelling of textile-reinforced thermoplastic composites under high velocity impact based on combined acoustic emission and electromagnetic emission measurements / G.O. Shchegel, R. Böhm, A. Hornig, V.V. Astanin, W.A. Hufenbach // Int. J. Impact Engineer. — 2014. — vol. 69. — p. 1-10.
- [4] Shchegel G.O. Modellierung des Verhaltens von Mehrkomponenten-Verbundmaterialien bei Hochgeschwindigkeitsbelastung / G.O. Shchegel // Diss. akad. Grad. Dr.-Ing. — Technische Universität Dresden. — 2011. — 138 p.
- [5] Щегель Г.О. Деформування та руйнування пластин із композиційних матеріалів при ударному навантаженні / Г.О. Щегель // дис. канд. техн. наук: 01.02.04. — К. — 2013. — 194 с.
- [6] Проникание и пробивание твердых тел / Динамика удара / Дж.А. Зукас, Т. Николас, Х.Ф. Свифт. — С.С. Григорян, ред. — М.: Мир, 1985. — с. 110-172.
- [7] Qian Y. A comparison of solution techniques for impact response of composite plates / Y. Qian, S.R. Swanson // Compos. Struct. — 1990. — vol. 14. — p. 177-192.
- [8] Разрушение композитных материалов при ударе с малыми скоростями / Динамика удара / Дж.А. Зукас, Т. Николас, Х.Ф. Свифт. — С.С. Григорян, ред. — М.: Мир, 1985. — с. 8-46.
- [9] Caprino G. Elastic behaviour of composite structures under low velocity impact / G. Caprino, I.C. Crivelli Visconti, A. Di Ilio // Composites. — 1984. — vol. 15. — № 3. — p. 231-234.
- [10] Christoforou A.P. Scaling of low-velocity impact response in composite structures / A.P. Christoforou, A.S. Yigit // Compos. Struct. — 2009. — vol. 91. — p. 358-365.
- [11] Pavier M.J. Experimental techniques for the investigation of the effects of impact damage on carbon-fibre composites / M. J. Pavier, M. P. Clarke // Compos. Sci. Technol. — 1995. — vol. 55. — p. 157-169.
- [12] Pandita S.D. Impact properties of weft knitted fabric reinforced composites / S.D. Pandita, D. Falconet, I. Verpoest // Compos. Sci. Technol. — 2002. — vol. 62. — p. 1113-1123.
- [13] Hazizan Md.Akil The low velocity impact response of an aluminium honeycomb sandwich structure / Md. Akil Hazizan, W.J. Cantwell // Composites Part B. — 2003. — vol. 34. — p. 679-687.

- [14] Robinson P. Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated composites / P. Robinson, G.A.O. Davies // *Int. J. Impact Eng.* — 1992. — vol. 12. — № 2. — p. 189-207.
- [15] Curtis P.T. CRAG test methods for the measurement of the engineering properties of fibre reinforced plastics / P.T. Curtis // *RAE Technical Report.* — TR88012. — 1988. —
- [16] Kistler L.S. On the response of curved laminated panels subjected to transverse impact loads / L.S. Kistler, A.M. Waas // *Int. J. Solids Struct.* — 1999. — vol. 36. — p. 1311-1327.
- [17] Oguibe C.N. Finite-element modelling of the impact response of a laminated composite plate / C.N. Oguibe, D.C. Webb // *Compos. Sci. Technol.* — 1999. — vol. 59. — p. 1913-1922.
- [18] Böhm R. Bruchmodebezogene Beschreibung des Degradationsverhaltens textilverstärkter Verbundwerkstoffe / R. Böhm // *Diss. akad. Grad. Dr.-Ing.* — Technische Universität Dresden. — 2008. — 123 p.
- [19] Gude M. Characterisation and simulation of the strain rate dependent material behaviour of novel 3D textile reinforced composites / M. Gude, C. Ebert, A. Langkamp // *ECCM-13 : European Conf. on Composite Materials*, 2-5 June 2008, Stockholm, Sweden : *Conf. Proc.* — 2008. — p. 1-15.
- [20] Hufenbach W. Experimental determination of the strain rate dependent out-of-plane shear properties of textile-reinforced composites / W. Hufenbach, A. Langkamp, A. Hornig // *ICCM-17 : 17th Int. Conf. on Composite Materials*, 27-31 July 2009, Edinburgh, UK : *Conf. Proc.* — 2009. — p. 1-9.
- [21] Tita V. Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: experimental and numerical approaches / V. Tita, J. Carvalho, Vandepitte D. // *Composite Structures.* — 2008. — № 83. — p. 413-428.
- [22] Hufenbach W. Characterisation of strain-rate dependent material properties of textile-reinforced thermoplastics for crash and impact analysis / W. Hufenbach, A. Langkamp, M. Gude // *Procedia Mater. Sci.* — 2013. — № 2. — p. 204-211.
- [23] Matzenmiller A. A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites / A. Matzenmiller, J. Lubliner, R.L. Taylor // *Mech. Mater.* — 1995. — vol. 20. — № 2. — p. 125-152.
- [24] Böhm R. A phenomenologically based damage model for textile composites with crimped reinforcement / R. Böhm, M. Gude, W. Hufenbach // *Compos. Sci. Technol.* — 2010. — vol. 70. — p. 81-87.
- [25] Astanin V.V. Experimental complex for material impact strength researches / V.V. Astanin, G.O. Olefir, A.V. Balalaev // *10th Jubileum Sci.-Tech. Conf. : MES we wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania*, 13-16 Nov. 2007, Kazimierz Dolny, Poland : *Conf. Proc.* — 2007. — p. 13-14.
- [26] Astanin V.V. Electromagnetic emission of composite materials at high-velocity impact loading / V.V. Astanin, G.O. Shchegel // *Aviation in the XXI century. Safety in aviation and space technology : 4th World Congress*, 21-23 Sept. 2010, Kyiv : *Conf. Proc.* — 2010. — vol. 1. — p. 13.33-13.41.
- [27] Бронеодежда. Классификация и общие технические требования : 50744-95. — [Принят 1995-02-27]. — М.: НИИ спецтехники МВД России, 8 с. — ГОСТ Р.
- [28] Ballistic resistant protective materials : NIJ 0108.01. — [Valid from 1985-09-01]. — N.Y.: U.S. Department of Justice. National Institute of Justice, 16 p. — NIJ Standard.
- [29] Luft- und Raumfahrt. Faserverstärkte Kunststoffe. Prüfung von multidirektionalen Laminaten. Bestimmung der Druckfestigkeit nach Schlagbeanspruchung : DIN 65561: 1991. — [Valid from 1991-05-]. — В.: Deutsches Institut für Normung, 6 p. — DIN Norm.
- [30] Kunststoffe. Normalklimate für Konditionierung und Prüfung : DIN EN ISO 291: 2008. — [Valid from 2008-08-]. — В.: Deutsches Institut für Normung, 12 p.
- [31] Umweltprüfungen. Teil 1: Allgemeines und Leitfaden : DIN EN 60068-1:1994. — [Valid from 1995-03-]. — В.: Deutsches Institut für Normung, 15 p. — DIN Norm.
- [32] Hufenbach W. Strain rate dependent low velocity impact response of layerwise 3D-reinforced composite structures / W. Hufenbach, M. Gude, C. Ebert, M. Zschehyge, A. Hornig // *Int. J. Impact Eng.* — 2011. — № 38. — p. 358-368.
- [33] Астанін В.В. Ударна міцність новітніх багатокомпонентних композитів при високих швидкостях / В.В. Астанін, Г.О. Щегель // *Технологические системы.* — 2012. — т. 58. — № 1. — с. 43-45.
- [34] Олефір О.І. Система збору інформації про стан композитних елементів покриттів злітних смуг і автомобільних доріг / О.І. Олефір, А.О. Олефір // *Технологические системы.* — 2013. — № 2(63). — с. 44-47.
- [35] Олефір О.І. Складні композитні структури у конструкціях покриттів злітних смуг / О.І. Олефір, А.О. Олефір // *Технологические системы.* — 2012. — № 1(58). — с. 41-42.
- [36] Астанін В.В. Моделювання ударної взаємодії багатокомпонентних композитів при високих швидкостях / В.В. Астанін, Г.О. Щегель // *Технологические системы.* — 2013. — № 2(63). — с. 39-43.
- [37] Астанін В.В. Чисельне моделювання швидкісного удару армованих сітками пружних композитів / В.В. Астанін, О.І. Олефір, Г.О. Щегель, А.О. Олефір // *Технолог. сист.* — 2014. — № 4(69). — с. 22-29.
- [38] Астанін В.В. Особливості поведінки пружних композитних зразків при ударному навантаженні / В.В. Астанін, О.І. Олефір, Г.О. Щегель, А.О. Олефір // *Технологические системы.* — 2013. — № 4(65). — с. 33-38.

Astanin V. V., Olefir O. I., Shchegel G. O., Olefir A. O.

National Aviation University. Ukraine, Kyiv

PECULIARITIES OF IMPACT DAMAGE OF TEXTILE-REINFORCED COMPOSITE MATERIALS UNDER HIGH AND LOW IMPACT SPEEDS

A comparative analysis of the experimental and numerical data on the damage of textile reinforced composite materials as a result of high-speed and low-speed impact with a constant level of initial kinetic energy of the impactor. Damage formation peculiarities are analyzed, an attempt to explain them in terms of the previously proposed model of damage of multicomponent composite materials under impact load over a wide speed range is made, based on the probabilistic approach to analysis of destruction and restoration of bonds between material structural elements.

Keywords: textile-reinforced composites; impact strength; FEM; mechanical damage; probabilistic damage model.

References

- [1] Astanin V.V. Impact deformation and fracture of hybrid composite materials / V.V. Astanin, G.O. Shchegel // Strength Mater. — 2011. — vol. 43. — № 6. — p. 615-627.
- [2] Astanin V.V. Characterising failure in textile-reinforced thermoplastic composites by electromagnetic emission measurements under medium and high velocity impact loading / V.V. Astanin, G.O. Shchegel, W. Hufenbach, A. Hornig, A. Langkamp // Int. J. Impact Eng. — 2012. — vol. 49. — p. 22-30.
- [3] Shchegel G.O. Probabilistic damage modelling of textile-reinforced thermoplastic composites under high velocity impact based on combined acoustic emission and electromagnetic emission measurements / G.O. Shchegel, R. Böhm, A. Hornig, V.V. Astanin, W.A. Hufenbach // Int. J. Impact Engineer. — 2014. — vol. 69. — p. 1-10.
- [4] Shchegel G.O. Modellierung des Verhaltens von Mehrkomponenten-Verbundmaterialien bei Hochgeschwindigkeitsbelastung / G.O. Shchegel // Diss. akad. Grad. Dr.-Ing. — Technische Universität Dresden. — 2011. — 138 p.
- [5] Shchegel G.O. Deformation and fracture of plates made of composite materials under impact loading / G.O. Shchegel // PhD Diss.: 01.02.04. — Kyiv. — 2013. — 194 P.
- [6] Penetration and punching of solids / Dynamics of impact / J.A. Zukas, T. Nicolas, Ch.F. Swift. — S.S. Grygorian, ed. — M.: Mir, 1985. — c. 110-172.
- [7] Qian Y. A comparison of solution techniques for impact response of composite plates / Y. Qian, S.R. Swanson // Compos. Struct. — 1990. — vol. 14. — p. 177-192.
- [8] Destruction of composite materials under low-speed impact/ Dynamics of impact / J.A. Zukas, T. Nicolas, Ch.F. Swift. — S.S. Grygorian, ed. — M.: Mir, 1985. — p. 8-46.
- [9] Caprino G. Elastic behaviour of composite structures under low velocity impact / G. Caprino, I.C. Crivelli Visconti, A. Di Ilio // Composites. — 1984. — vol. 15. — № 3. — p. 231-234.
- [10] Christoforou A.P. Scaling of low-velocity impact response in composite structures / A.P. Christoforou, A.S. Yigit // Compos. Struct. — 2009. — vol. 91. — p. 358-365.
- [11] Pavier M.J. Experimental techniques for the investigation of the effects of impact damage on carbon-fibre composites / M. J. Pavier, M. P. Clarke // Compos. Sci. Technol. — 1995. — vol. 55. — p. 157-169.
- [12] Pandita S.D. Impact properties of weft knitted fabric reinforced composites / S.D. Pandita, D. Falconet, I. Verpoest // Compos. Sci. Technol. — 2002. — vol. 62. — p. 1113-1123.
- [13] Hazizan Md.Akil The low velocity impact response of an aluminium honeycomb sandwich structure / Md. Akil Hazizan, W.J. Cantwell // Composites Part B. — 2003. — vol. 34. — p. 679-687.
- [14] Robinson P. Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated composites / P. Robinson, G.A.O. Davies // Int. J. Impact Eng. — 1992. — vol. 12. — № 2. — p. 189-207.
- [15] Curtis P.T. CRAG test methods for the measurement of the engineering properties of fibre reinforced plastics / P.T. Curtis // RAE Technical Report. — TR88012. — 1988. —
- [16] Kistler L.S. On the response of curved laminated panels subjected to transverse impact loads / L.S. Kistler, A.M. Waas // Int. J. Solids Struct. — 1999. — vol. 36. — p. 1311-1327.
- [17] Oguibe C.N. Finite-element modelling of the impact response of a laminated composite plate / C.N. Oguibe, D.C. Webb // Compos. Sci. Technol. — 1999. — vol. 59. — p. 1913-1922.

- [18] Böhm R. Bruchmodebezogene Beschreibung des Degradationsverhaltens textilverstärkter Verbundwerkstoffe / R. Böhm // Diss. akad. Grad. Dr.-Ing. – Technische Universität Dresden. – 2008. – 123 p.
- [19] Gude M. Characterisation and simulation of the strain rate dependent material behaviour of novel 3D textile reinforced composites / M. Gude, C. Ebert, A. Langkamp // ECCM-13 : European Conf. on Composite Materials, 2-5 June 2008, Stockholm, Sweden : Conf. Proc. – 2008. – p. 1-15.
- [20] Hufenbach W. Experimental determination of the strain rate dependent out-of-plane shear properties of textile-reinforced composites / W. Hufenbach, A. Langkamp, A. Hornig // ICCM-17 : 17th Int. Conf. on Composite Materials, 27-31 July 2009, Edinburgh, UK : Conf. Proc. – 2009. – p. 1-9.
- [21] Tita V. Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: experimental and numerical approaches / V. Tita, J. Carvalho, Vandepitte D. // Composite Structures. – 2008. – № 83. – p. 413-428.
- [22] Hufenbach W. Characterisation of strain-rate dependent material properties of textile-reinforced thermoplastics for crash and impact analysis / W. Hufenbach, A. Langkamp, M. Gude // Procedia Mater. Sci. – 2013. – № 2. – p. 204-211.
- [23] Matzenmiller A. A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites / A. Matzenmiller, J. Lubliner, R.L. Taylor // Mech. Mater. – 1995. – vol. 20. – № 2. – p. 125-152.
- [24] Böhm R. A phenomenologically based damage model for textile composites with crimped reinforcement / R. Böhm, M. Gude, W. Hufenbach // Compos. Sci. Technol. – 2010. – vol. 70. – p. 81-87.
- [25] Astanin V.V. Experimental complex for material impact strength researches / V.V. Astanin, G.O. Olefir, A.V. Balalaev // 10th Jubileum Sci.-Tech. Conf. : MES we wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania, 13-16 Nov. 2007, Kazimierz Dolny, Poland : Conf. Proc. – 2007. – p. 13-14.
- [26] Astanin V.V. Electromagnetic emission of composite materials at high-velocity impact loading / V.V. Astanin, G.O. Shchegel // Aviation in the XXI century. Safety in aviation and space technology : 4th World Congress, 21-23 Sept. 2010, Kyiv : Conf. Proc. – 2010. – vol. 1. – p. 13.33-13.41.
- [27] Impact-resistant clothes. Classification and general technical requirements : 50744-95. – [Appr. 1995-02-27]. – M.: Res. Inst. of spec. equipment of Rus. Inter. Min., 8 p. – GOST R.
- [28] Ballistic resistant protective materials : NIJ 0108.01. – [Valid from 1985-09-01]. – N.Y.: U.S. Department of Justice. National Institute of Justice, 16 p. – NIJ Standard.
- [29] Luft- und Raumfahrt. Faserverstärkte Kunststoffe. Prüfung von multidirektionalen Laminaten. Bestimmung der Druckfestigkeit nach Schlagbeanspruchung : DIN 65561: 1991. – [Valid from 1991-05-]. – B.: Deutsches Institut für Normung, 6 p. – DIN Norm.
- [30] Kunststoffe. Normalklimate für Konditionierung und Prüfung : DIN EN ISO 291: 2008. – [Valid from 2008-08-]. – B.: Deutsches Institut für Normung, 12 p.
- [31] Umweltprüfungen. Teil 1: Allgemeines und Leitfaden : DIN EN 60068-1:1994. – [Valid from 1995-03-]. – B.: Deutsches Institut für Normung, 15 p. – DIN Norm.
- [32] Hufenbach W. Strain rate dependent low velocity impact response of layerwise 3D-reinforced composite structures / W. Hufenbach, M. Gude, C. Ebert, M. Zscheyge, A. Hornig // Int. J. Impact Eng. – 2011. – № 38. – p. 358-368.
- [33] Astanin V.V. Impact strength of novel multicomponent composites at high velocities / V.V. Astanin, G.O. Shchegel // Technological systems. – 2012. – № 1(58). – № 1. – c. 43-45.
- [34] Olefir O.I. Collection system for status information of composite elements of runway and road coatings / O.I. Olefir, A.O. Olefir // Technological systems. – 2013. – № 2(63). – p. 44-47.
- [35] Olefir O.I. Complex composite structures in constructions of runway coatings / O.I. Olefir, A.O. Olefir // Technological systems. – 2012. – № 1(58). – p. 41-42.
- [36] Astanin V.V. Modeling the impact interaction of multicomponent composites at high velocities / V.V. Astanin, G.O. Shchegel // Technological systems. – 2013. – № 2(63). – p. 39-43.
- [37] Astanin V.V. Numerical simulation of high-speed impact of net-reinforced flexible composites / V.V. Astanin, O.I. Olefir, G.O. Shchegel, A.O. Olefir // Technological systems. – 2014. – № 4(69). – c. 22-29.
- [38] Astanin V.V. Characteristics of elastic composite samples behaviour at impact loads / V.V. Astanin, O.I. Olefir, G.O. Shchegel, A.O. Olefir // Technological systems. – 2013. – № 4(65). – p. 33-38.