

УДК 539.3/.5:620.178.7

Астанін В.В., Олефір О.І., Щегель Г.О., Олефір А.О.

Національний авіаційний університет. Україна, м. Київ

ОСОБЛИВОСТІ ПОВЕДІНКИ ПРУЖНИХ КОМПОЗИТНИХ ЗРАЗКІВ ПРИ УДАРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Встановлені закономірності поведінки гнучкого еластичного волоконнозміцненого матеріалу при ударі, які полягають у характері зміни енергопоглинання матеріалу в залежності від пружних властивостей матриці та типу плетення армувальної тканини і які розкривають метод створення матеріалів та конструктивних пластинчатих чи оболонкових елементів із нього із суттєвими властивостями гнучкості і еластичності та ударної міцності у відповідних межах деформації.

Ключові слова: гнучкі еластичні композити; ударна міцність; тип армуючого плетення; текстильнозміцнені композити; енергопоглинання.



Постановка задачі

У сфері розробки захисних матеріалів та конструктивних елементів із них пропонувалася серія рішень для досягнення підвищеної ударної міцності конструкцій, зокрема, описаних у [1–3]. Особливо актуальними є розробки в області композиційних захисних удароміцних матеріалів на основі волоконного зміцнення, зокрема, сформованого у вигляді текстильного полотна, що також носить назву текстильного зміцнення чи армування, які застосовуються для виготовлення захисного спорядження, форми одягу, щитів, елементів рятувального і захисного обладнання, транспортних засобів протипожежного, якщо пожежа супроводжується ймовірними вибухами чи розлітанням уламків, антивандального для використання міліцією, рятувальними командами, що працюють у вибухонебезпечних умовах чи при природних катаклізмах, таких як град та ін. призначення.

Для таких конструкцій, як елементи підводного спорядження, деформівні еластичні прокладки, шини, газові камери, газові балони, в т.ч. для човнів на повітряній подушці, та для виготовлення демпфуючих, звукопоглинаючих, теплоізолюючих, електроізолюючих гнучких чи високодеформівних елементів конструкції наземних та повітряних транспортних засобів постає задача створення матеріалів, які володіють підвищеним опором пошкодженню і руйнуванню після досягнення деформаціями певного необхідного рівня та підвищеною ударною міцністю при збереженні гнучкості і деформівності для виконання своїх функціональних задач. Таким чином, вимоги до еластичних захисних систем полягають у наступному:

- гнучкість матеріалу;
- деформівність матеріалу (розтяжність);
- відсутність опору розтягуванню при малих деформаціях, але підвищений опір і міцність при досягненні певного рівня деформацій (тобто опір розриву) при ударному навантаженні.

Способи досягнення необхідних властивостей включають наступні традиційні підходи:

- застосування «лускатого» одягу або компонування захисних чохла обладнання, причому жорсткі ударостійкі елементи з'єднані рухомими зв'язками;

- застосування волоконнозміцнених матеріалів з пружною матрицею, що дозволяє отримати елементи підвищеної міцності, але низької гнучкості і деформівності.

Таким чином, існуючі способи вирішення поставленої задачі в кожному випадку не дозволяють задовольнити вимогу до проєктованих конструкцій, яка полягає у необхідності забезпечити незначний опір малим деформаціям, але підвищену жорсткість після досягнення ними певного критичного рівня.

Досліджені матеріали

В основу представленого дослідження закладена гіпотеза, що полягає у тому, що застосування волоконнозміцнених матеріалів з пружною матрицею і деформівним типом плетіння волокон, таким як трикотаж, забезпечить підвищені захисні властивості композиційного матеріалу при ударі завдяки підвищеному енергопоглинанню за рахунок забезпечення наявності двох фаз чи етапів взаємодії із матеріалом, а саме початкового виробітку деформівності самого волоконного армуючого полотна, а надалі сумісної роботи волокна і матриці із традиційним перерозподілом напружень і деформацій у матеріалі, коли деформування розтягу армованого зазвичай шаруватого матеріалу як цілого у площині його полотна супроводжується переважно зростанням деформацій зміцнювального волокна, а не переважно витяганням хвилястості укладки волоконної ниті. Перевагами запропонованого методу досягнення підвищеного енергопоглинання при ударі є відсутність опору розтягуванню при малих деформаціях, тому що працює пружна матриця і витрачається деформівність плетіння, але підвищений опір і висока міцність при досягненні певного рівня деформацій, які відповідають переходу від першої фази деформування до другої, при ударному навантаженні, тому що в роботу вступають безпосередньо міцні волокна.

У відповідності до вказаного, доцільним було використання в досліджуваних зразках шаруватих композитів петельного плетіння, яке має своїм результатом хвилястість волоконного зміцнення. Це пояснюється також тим, що при роботі полотна на розтяг потрібно, щоб волокна негайно чинили опір розтягуванню матриці – хвилястість часто не потрібна, але при роботі на удар перпендикулярно до площини ламінату необхідно поглинути максимальну енергію при мінімальному пошкодженні, тобто перетворити її на пружну енергію деформування і розсіяти в тепло, а не на ушкодження. Важливим завданням є визначення комбінацій текстильного зміцнення (полотняне, трикотажне плетіння чи в'язка) та матриць різної пружності, що володіють підвищеною міцністю при ударному навантаженні.

У попередніх установчих експериментах були обрані для подальшого дослідження комбінації типів волокна, плетіння і матриці, необхідні для перевірки висунутого припущення, а саме волоконне плетіння підвищеної та низької хвилястості з базальтового волокна у порівнянні з базовим матеріалом на основі вуглеволокна, а також матриці підвищеної і зниженої еластичності, причому досліджувалася також залежність від кількості шарів матеріалу. Таким чином, оптимальні типи текстильного зміцнення для попередніх випробувань: ба-

зальтове плетіння типу 1, діагональна саржа, «ВТ-25», густина 320 г/м², підвищена деформівність (з 0,5% за рахунок типу плетіння, тобто за відсутності суттєвого натягу волокна); базальтове плетіння типу 2, полотняне плетіння, «ТБК-100», густина 270 г/м², понижена деформівність; вуглеволоконна тканина полотняного плетіння із пониженою

ку з цим була розроблена нова модель випробувальної установки, розрахованої спеціально для випробувань малих зразків із еластичних матеріалів. Таким чином, були визначені геометричні параметри зразків і схема експерименту, параметри реалізованих дослідів та експериментальної установки приведені у табл. 1.

Таблиця 1.

Параметри реалізованих дослідів та експериментальної установки

Параметр	Значення		
Дослідницька установка	aSTanin-I (Acceleration System for Testing of Antidamage Innovations)		
Діапазон швидкостей ударника	v_0	0..600	м/с
Діаметр ударника	d	4,5	мм
Маса ударника	m	0,3/0,4	г
Тип ударника	металевий ударник зі сферичною носовою частиною		
Тип матеріалу	шаруватий волоконнозміцнений композит		
Діаметр зразка матеріалу	D	100	мм
Діаметр робочої області зразка матеріалу	D_0	75	мм
Товщина зразків	t	2	мм
Кріплення зразка матеріалу	защемлення по колу прямокутних зразків		

деформівністю. Обрані типи матриці: самовулканізований клей холодного затвердіння «СВ-1-5», резинова суміш «ИРП 1265», силікон типу А («Viksel U» виробництва НДІ «Еластик»), силікон типу Б («452 СН»), клей на основі дисперсії полівінілацетату ПЕ та поліетилен. Сформовані композиційні препреги досліджуваних типів матеріалу на основі резинової суміші піддавалися нагріванню до температури 160°С протягом 20 хвилин під пресом під тиском 50 атм, після чого проходили повітряну вулканізацію при температурі 200°С протягом 5 годин.

Результати випробувань і їх аналіз

Тестування ударної міцності здійснювалося за допомогою установки «aSTanin» («Acceleration System for Testing of Antidamage Innovations») при швидкостях до 315 м/с із застосуванням сталевого ударника зі сферичною носовою частиною діаметром $4,5 \times 10^{-3}$ м масою $0,3 \times 10^{-3}$ кг та $0,4 \times 10^{-3}$ кг, що імітували пошкоджуючі уламки. Для отримання максимально чистих даних без спотворюючих факторів доцільно використовувати схему випробувань з двома балістичними маятниками [4, 5]. Однак описаний у [6, 7] комплекс був розрахований на високі швидкості, великі діаметри ударника, масивні маятники, в той час як актуальним є створення гнучких композитів підвищеної ударної міцності для легкого протиуламкового захисту. У зв'яз-

Принципова схема дослідів передбачає ударну взаємодію закріпленого на балістичному маятнику зразка матеріалу із розігнаним ударником, після чого його залишкова енергія визначається за допомогою другого балістичного маятника, що дозволяє скласти рівняння балансу енергії. В якості робочої газової суміші термогазобалістичної розгінної установки може застосовуватися стиснене повітря для досягнення швидкостей $v_0 < 320$ м/с; кисневоводневогелієва суміш разом із пропанбутановою сумішшю $v_0 < 20 \dots 600$ м/с.

Перша група А досліджених зразків була сформована на основі матеріалів із хвилястим плетінням волоконного армуючого полотна та матрицями різної пружності (у порядку, наведеному при описі компонентів матеріалів у попередньому розділі від низької у зразках типу 1 до високої у зразках типу 5). На рис. 1 приведена гістограма усереднених значень енергопоглинання зразків матеріалу при ударі.

Група В досліджуваних зразків матеріалу формувалася аналогічно групі А, проте застосовувалося полотняне плетіння армувальної тканини, хвилястістю якого можна знехтувати. Результати досліджень показали неоднозначність підвищення енергопоглинання зі зростанням пружності матриці (рис. 2).

Із порівняння тенденцій зміни енергопоглинання в залежності від комбінації деформівності пле-

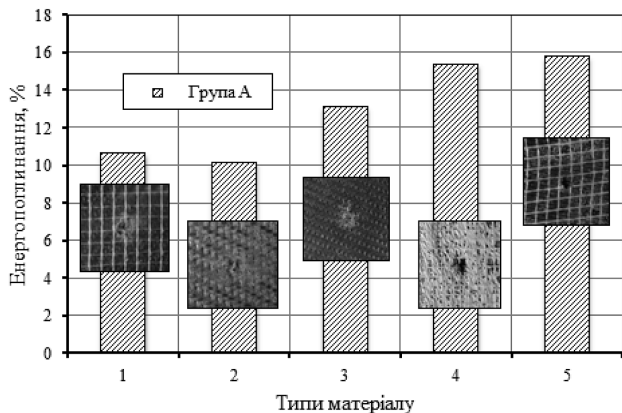


Рис. 1. Енергопоглинання зразків досліджених матеріалів із хвилястим плетінням волоконного армуючого полотна

тєння армуючого полотна та пружності матриці, виявлених гїстограмами на рис. 1 та рис. 2, можна зробити висновок про взаємозв'язок їх співвідношення та енергопоглинання матеріалу та можливість підбору оптимальних варіантів плетєння армуючого полотна. На рис. 3 та 4 приведені гїстограми, що ілюструють вплив застосування додаткових шарів матеріалу на його захисні властивості при незмінній комбінації типу армуючого плетєння та пружності матриці.

Як показали результати дослідів, застосування оптимальних комбінацій типу плетєння та типу матриці дозволяло забезпечити підвищення енергопоглинання пластинчатих зразків матеріалу з 45 % до 68 % від енергії удару. Застосування системи тонких шарів із проміжними шарами дозволило досягти значень енергопоглинання до 85 % від енергії удару.

Таким чином, підвищене енергопоглинання матеріалу визначається наявністю першої фази деформування, яка характеризується відсутністю суттєвих пошкоджень композиту по границі волоконно-матриця завдяки високій деформівності не

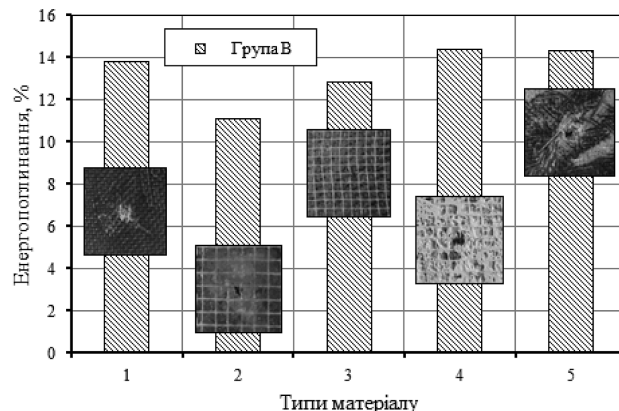


Рис. 2. Енергопоглинання базових зразків досліджених матеріалів із незначною хвилястістю плетєння

лише матриці та волоконного плетєння, а також зростає при сумісній роботі системи шарів. Суттєвим, таким чином, являється співвідношення деформівності полотна, визначеної хвилястістю плетєння, та деформівності матриці, визначеної її еластичністю, і те, що правильно обране співвідношення дозволяє перейти у другу фазу деформування без суттєвих пошкоджень по границі волоконно-матриця, а значить, забезпечити якісну сумісну роботу волокна і матриці композиту, в той час як ударне тіло вже частково сповільнене у першій фазі деформування.

При створенні гнучких еластичних волоконнозміцнених композитів із високодеформівним завдяки хвилястості укладєння волокон плетєнням, у яких можна виділити описані вище дві фази деформування, важливу роль у описі поведінки матеріалу відіграє модуль пружності першого роду на розтяг армуючого полотна, що грає провідну роль у першій фазі деформування протягом поступового випрямлення вказаної хвилястості волоконного плетєння до досягнення відносною деформацією значєння повного випрямлення вказаної хвиляс-

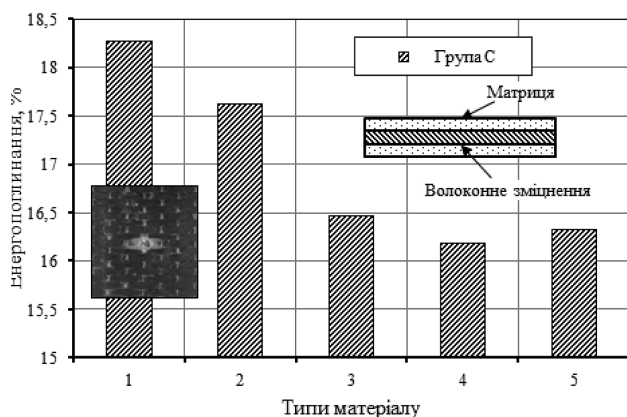


Рис. 3. Енергопоглинання зразків досліджених матеріалів із хвилястим плетінням волоконного армуючого полотна

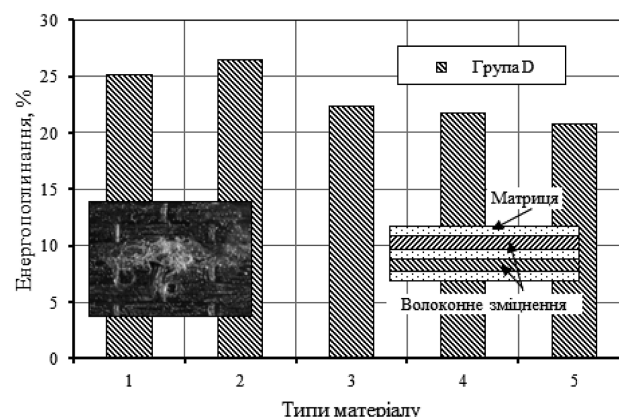


Рис. 4. Енергопоглинання базових зразків досліджених матеріалів із незначною хвилястістю плетєння

тості. Його необхідно відрізнити від визначеного властивостями застосовуваних волокон у нормальному розпрямленому вигляді модуля пружності першого роду на розтяг вказаного полотна у наступній фазі деформування.

Із порівняння властивостей досліджених типів матеріалу кожної із груп можна зробити висновок про те, що оптимальна комбінація типу волоконного армування та матриці повинна характеризуватися тим, що ткане, в'язане чи трикотажне армуюче полотно із високодеформівним завдяки хвилястості укладення волокон плетінням має модуль пружності першого роду на розтяг вказаного полотна не вищий за модуль пружності першого роду на розтяг застосовуваної матриці у першій фазі деформування протягом поступового випрямлення вказаної хвилястості волоконного плетіння до досягнення відносною деформацією значення повного випрямлення вказаної хвилястості. З іншої сторони, модуль пружності першого роду на розтяг вказаного полотна у наступній фазі деформування повинен бути вищим за модуль пружності першого роду на розтяг застосовуваної матриці при подальшому зростанні деформації понад вказане значення після випрямлення хвилястості волоконного плетіння, причому вказане значення відносною деформації при повному випрямленні хвилястості плетіння полотна повинен бути нижчим за значення відносною деформації руйнування на розтяг матеріалу матриці композиту.

Область використання гнучкого еластичного волоконнозміцненого удароміцного матеріалу та конструктивних деталей із нього визначається сферами, де постає потреба у створенні захисних еластичних систем, що задовольняють наступним вимогам: гнучкість матеріалу; деформівність та еластичність матеріалу; відсутність значного опору розтягу до досягнення певного рівня деформації, але високий опір деформуванню та міцність після досягнення вказаного рівня деформації, зокрема, при ударному навантаженні.

Застосування еластичної матриці навіть із менш міцним волокном при забезпеченні хвилястості плетіння може підвищити сумарну ударну міцність композиту, що робить можливим застосування еластичних композитів, зокрема, для еластичних удароміцних захисних костюмів рятувальників, гумових камер, створення гнучких пристроїв протиуламкового захисту

Висновки

У проведеному дослідженні встановлені закономірності поведінки гнучкого еластичного волоконнозміцненого матеріалу при ударі, які полягають у

характері зміни енергопоглинання матеріалу в залежності від пружних властивостей матриці та типу плетіння армувальної тканини і які розкривають метод створення матеріалів та конструктивних пластинчатих чи оболонкових елементів із нього із суттєвими властивостями гнучкості і еластичності та ударної міцності у відповідних межах деформації. Це дозволяє досягти підвищення функціональності, розширення сфери і умов застосування матеріалів, покращення їх захисних функцій при забезпеченні гнучкості та високої еластичності в межах, необхідних для виконання функцій матеріалу чи виконаної із нього деталі.

Встановлено, що ключову роль у досягненні підвищеної ударної міцності гнучких еластичних композитів відіграє співвідношення модулів пружності першого роду на розтяг армуючого полотна і матриці до і після досягнення значення відносною деформації, за якої досягається випрямлення хвилястості волоконного плетіння, а також значення вказаної відносною деформації і відносною деформації руйнування матеріалу матриці. Даний ефект проявляється при створенні композитів шляхом застосування як гібридовоолоконного полотна, так і полімерних плівок і армуючого волоконного полотна.

Література

- [1] Астанін В. В. Ударна міцність новітніх багатокомпонентних композитів при високих швидкостях / В. В. Астанін, Г. О. Щегель // Технологические системы. – 2012. – №1(58). – С. 43–45.
- [2] Патент US 6807891 B2. Flexible impact-resistant materials. St. E. Fisher – Опубл. 26.10.2004.
- [3] Патент US 2010/0040816 A1. Silk fibre composites. I. Verpoest, A. W. Van Vuure, N.E. Asmar, J. Vanderbeke – Опубл. 18.02.2010.
- [4] Astanin V. V. Experimental complex for material impact strength researches / V. V. Astanin, G. O. Olefir, A. V. Balalaeв // Journal of KONES. Powertrain and Transport. – 2008. – Т. 15, № 1. – Р. 17–28.
- [5] Astanin V. V. Impact deformation and fracture of hybrid composite materials / V. V. Astanin, G. O. Shchegel // Strength of Materials. – 2011. – Т. 43, № 6. – Р. 615–627.
- [6] 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. of Impact Engineering. – 2012. – Т. 49. – Р. 22–30.
- [7] Астанін В. В. Застосування балістичного маятника для дослідження ударної міцності матеріалів / В. В. Астанін, Г. О. Олєфір // Наукоємні технології. – 2009. – №2. – Р. 19–24.



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

National Aviation University. Ukraine, Kyiv

CHARACTERISTICS OF ELASTIC COMPOSITE SAMPLES BEHAVIOUR AT IMPACT LOADS

Characteristics of behavior of flexible elastic fiber-reinforced materials under impact are revealed. They reside in the nature of changes of material energy absorption depending on the elastic properties of the matrix and the type of reinforcement textile braiding. On basis of the behavior peculiarities a method of creating materials and structural plate or shell elements of it characterized with essential properties of flexibility, elasticity and impact strength in the relevant range of deformation is identified.

Keywords: flexible elastic composites; impact strength; type of reinforcement braiding; textile-reinforced composites; energy absorption .

References

- [1] Astanin V. V. Impact strength of modern multicomponent composites at high velocities / V. V. Astanin, G. O. Shchegel // Technological systems. – 2012. – №1(58). – P. 43–45. (In Ukrainian)
- [2] Patent US 6807891 B2. Flexible impact-resistant materials. St. E. Fisher – Publ. 26.10.2004.
- [3] Patent US 2010/0040816 A1. Silk fibre composites. I. Verpoest, A. W. Van Vuure, N. E. Asmar, J. Vanderbeke – Publ. 18.02.2010.
- [4] Astanin V. V. Experimental complex for material impact strength researches / V. V. Astanin, G. O. Olefir, A. V. Balalaev // Journal of KONES. Powertrain and Transport. – 2008. – V. 15, № 1. – P. 17–28.
- [5] Astanin V. V. Impact deformation and fracture of hybrid composite materials / V. V. Astanin, G. O. Shchegel // Strength of Materials. – 2011. – V. 43, № 6. – P. 615-627.
- [6] 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. of Impact Engineering. – 2012. – V. 49. – P. 22–30.
- [7] Astanin V. V. Appliance of ballistic pendulum for investigation of impact strength of materials / V. V. Astanin, G. O. Olefir // Scientific technologies. – 2009. – №2. – P. 19–24. (In Ukrainian)