

УДК 620.172.242

DOI: 10.18372/0370-2197.4(109).20759

*О. О. МІКОСЯНЧИК, О. А. ШЕВЧЕНКО, В. С. ДУБОВИК, С. Р. МНАЦКАНОВ,
Г. Г. ГОЛЕМБІЄВСЬКИЙ, С. В. ФЕДОРЧУК*

Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

ОЦІНКА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГІБРИДНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ РОЗТЯГУ

Розглянуто поведінку міжшарових гібридних полімерних композитів (ГПК) на основі вугле- та склотканин при статичному розтягу з урахуванням особливостей їх деформування. Досліджено гібридні композити на основі вугле- та склотканин з різною схемою укладання шарів методом вакуумного формування. Встановлено, що деформація ГПК при розтягу в подовжньому напрямку носить складний характер та супроводжується протіканням різних процесів, які домінують на певних стадіях подовження досліджуваного зразка під дією навантаження. Одержано діаграми деформування зразків ГПК, обґрунтовано їх нелінійний характер в діапазоні деформування 0,25-0,8%, що обумовлено зростанням концентрації напружень у полімерній матриці, інтенсифікацією пластичних деформацій та деформування матриці, що спричинює утворення мікротріщин в ній, відшарування міжфазної поверхні та передачу навантаження на армуючі волокна. Визначено дві точки розриву зразків при одноосовому розтягу: перший розрив спричинений крихким руйнуванням вуглецевих волокон, другий розрив пов'язаний з руйнуванням скловолокон за механізмом витягування. Формування 8-ми шарового ГПК з двома зовнішніми шарами на основі склотканини конструкційної ровінгової та двома шарами односпрямованої вуглетканини паралельно прикладеному навантаженню та чотирма внутрішньо розташованими шарами склотканини з атласним плетінням забезпечує максимальну границю міцності 660,7 МПа (перший розрив), границю міцності на розрив 275,5 МПа (другий розрив) при максимальному відносному подовженні композиту 1,88%. Результати досліджень актуальні при розробці міжшарових ГПК шляхом поєднання вугле- та скловолокон з метою досягнення високої міцності ГПК за рахунок вуглецевого волокна та покращення процесів поглинання енергії за рахунок пластичної деформації скловолокон в структурі гібридного композиту.

Ключові слова: *гібридний композит, розтяг, деформація, руйнування, випробування.*

Вступ. Розвиток сучасних технологій вимагає нових конструкційних матеріалів, що перевершують за міцністю, еластичністю та іншими властивостями традиційні. Найбільш цікавими та перспективними серед них є полімерні композиційні матеріали (ПКМ), які характеризуються високою питомою міцністю та низькими питомими витратами енергії на виробництво.

Завдяки своїм особливим властивостям ПКМ добре підходять для застосування в аерокосмічній промисловості. ПКМ мають підвищену стійкість до корозії та зносу, відкритого вогню і нагрівання, забезпечують підвищену стійкість до пошкоджень і ударів, високу міцність при різних статичних і динамічних навантаженнях, характеризуються високими показниками щодо шумопоглинання та гасіння вібрацій, опору руйнування. Відповідно до [1], на частку ПКМ, що використовуються в авіаційній галузі, припадає понад 50% від загального річного виробництва композитів у США. ПКМ використовуються у виробництві численних авіаційних компонентів, включаючи авіаційні гальма,

перегородки відсіків, ілюмінатори, ротори двигунів, несучі конструкції, секції фюзеляжу, кесони крила, шпангоути, лопатки турбін, закрилки і хвостове оперення літаків і вертольотів [2].

Розвиток авіабудування пов'язаний з постійним пошуком рішень, направлених на зниження ваги конструкції, що може бути досягнуто за рахунок раціонального вибору матеріалів та силових схем, застосування раціональних технологічних процесів, а також уточнення навантажень на конструкцію.

Одним з напрямків розширення спектру нових конструкційних матеріалів авіаційного призначення є розробка композиційних матеріалів з покращеними характеристиками за рахунок армування двома або більше волокнами в одній полімерній матриці, що призводить до створення передової низки гібридних композиційних матеріалів з великою різноманітністю властивостей.

Розробка наукових принципів формування гібридних ПКМ дозволило б розширити сферу ефективного застосування полімерних композитів конструкційного призначення.

Огляд публікацій та аналіз невіршених проблем. Впровадження ПКМ в аерокосмічну галузь є першочерговим етапом досягнення високої структурної ефективності авіаційних конструкцій при мінімальній вазі, що робить значний внесок у зниження витрати палива і збільшення корисного навантаження. Наприклад, армований вуглецевим волокном полімер має мінімальну границю текучості 550 МПа, а щільність становить 1/5 від сталі і 3/5 від сплавів на основі алюмінію [3].

За останні роки волокнисто-армовані ПКМ розширили своє застосування в аерокосмічній промисловості: вуглецеві армовані полімери з епоксидними матрицями використовуються для крил, фюзеляжів, вертикальних стабілізаторів та компонентів двигунів завдяки їх високій міцності та стійкості до втоми [4].

Обсяг ринку ПКМ збільшується з кожним роком, сфера застосування конструкційних композитів розширюється, однак разом з цим підвищуються вимоги до них. Основна проблема широкого застосування полімерних композитів конструкційного призначення полягає в їхній недостатній жорсткості. Скловолокно одне по собі має дуже низький модуль Юнга, модуль зсуву та коефіцієнт Пуассона, і через цей недолік цей матеріал не рекомендується для багатьох конструкцій у літаках. З іншого боку, вуглецеве волокно має дуже ефективні механічні властивості, але воно занадто дороге, також слід зазначити, що орієнтація волокон суттєво впливає на міцність конструкції [5].

Для несучих елементів конструкцій, в основному зі склопластиків, не завжди виконується умова міцності за граничним станом за експлуатаційною придатністю (граничні стани другої групи), що передбачає доцільність та необхідність розробки гібридних полімерних композитів (ГПК) поєднанням різних типів волокон у сполучнику.

У роботі [6] встановлено, що композити, армовані 60% вуглецевим волокном, демонструють збільшення пікового навантаження на 68,52%, порівняно з композитами, армованими 60% скловолокном, та на 35%, порівняно з гібридним композитом, армованим 30% скловолокном та 30% вуглеволокном. Гібридний композит демонструє велике пікове навантаження зі збільшенням частки армування вуглецевим волокном.

Головна особливість створення конструкції з ПКМ, порівняно з традиційно використовуваними металами, полягає в тому, що процес проектування виробу

починається зі створення самого матеріалу. І тут властивості матеріалу формуються у процесі виробництва конкретної конструкції. Ретельний вибір послідовності укладання та співвідношення гібридних волокон має вирішальне значення для оптимізації характеристик міцності та зниження ризику розшарування.

В роботі [7] зазначається, що форма гібридної структури та послідовність укладання є ключовим фактором, що визначає властивості при розтягу та поведінку руйнування матеріалу. Дві основні гібридні форми включають міжшаровий та внутрішньшаровий гібрид: міжшарові гібридні структури створюються шляхом регулювання послідовності укладання різних типів армуючих тканин, тоді як внутрішньшарові гібридні структури отримують шляхом зміни самих гібридних тканин.

Результати експериментальних досліджень квазістатичного навантаження на розтяг та стиск внутрішньшарового та міжшарового ГПК з використанням вуглецевих волокон T700SC, скляних волокон E-CR та епоксидної матриці демонструють вплив армування на механічні властивості ГПК [8]. Зазначено, що для міжшарового гібрида при розтягуванні встановлено позитивний гібридний ефект +7,4%, а при стисканні проявився негативний гібридний ефект -6,4%. Внутрішньшаровий гібрид з гібридною конфігурацією з трьома вуглецевими та трьома скляними джгутами, зблокованими разом, продемонстрував найкращі механічні характеристики: встановлено синергетичний ефект +17,8% та +39,6% за міцністю на розтяг та стиск відповідно.

Дослідження поведінки ГПК, армованих вуглецевими та скловолокнами, методом скінченно-елементного аналізу встановило, що найвища міцність на вигин спостерігалася при співвідношенні гібридних волокон від 0,2 до 0,3 (гібридне співвідношення визначалося як об'ємна частка скловолокна в загальній кількості).

Важливість послідовностей укладання волокон та вибір типів волокон для ГПК показано моделюванням механічних властивостей гібридних композитів, які поєднували вуглецеві та скляні волокна, в програмному забезпеченні ABAQUS: розміщення вуглецевих шарів в центрі багатошарових композитів забезпечує досягнення міцності на розтяг 155,4 МПа, тоді як розміщення вуглецевих шарів у зовнішньому шарі або середині ламінату композиту призвело до досягнення міцності на розтяг 145,7 МПа та 136 МПа відповідно [10].

Дослідження внутрішньшарових композитів, армованих вуглецево-арамідною/склотканою тканиною, представлені в [11], виявили, що послідовність укладання зовнішньої оболонки ламінатів суттєво впливає на модуль пружності на розтяг. Зокрема, застосування скловолокна на зовнішній стороні призвело до збільшення міцності на розтяг на 60%, порівняно з повністю вуглеволокнистими ламінатами.

Експериментальні результати оцінки міцнісних властивостей композитів з вуглецевого волокна та скловолокна, виготовлених методом вакуумної інфузії, показали, що вуглекомпозити демонструють найвищу границю міцності на розтяг (~550 МПа), при цьому руйнування переважно відбувається через розтріскування матриці та обрив волокон через їхню крихкість. Склокомпозити, маючи нижчу міцність на розтяг (~450 МПа), продемонстрували більшу пластичність, що пояснюється висмикуванням волокон та розтріскуванням матриці. Гібридні композити, що поєднують вугле- та скловолокна, показали

проміжну міцність на розтяг (~500 МПа) та проявили змішані режими руйнування [12].

Для ГПК з вугле- та скловолокон при оцінці їх міцнісних характеристик були представлені три різні гіпотези гібридного ефекту: вплив залишкових напружень; зміни у розвитку пошкоджень, що призводять до залишкового руйнування; динамічні концентрації напружень [13].

Проведений огляд літературних джерел виявив, що не систематизовані завдання вибору (проектування) внутрішньої структури ГПК, матеріалознавчі аспекти по вибору армуючих складових та типу сполучника, технології виготовлення гібридних композитів, немає єдиного методичного підходу до оцінки властивостей ГПК при механічних випробуваннях, не розроблено облік ушкоджень для оцінки механізмів руйнування композитів.

Однак, активний розвиток проектування та виготовлення ГПК направлений на підвищення ефективності конструкцій, розробку довговічних матеріалів, забезпечення високого рівня експлуатаційних характеристик готовим виробам зумовлює інноваційний розвиток галузі виробництва ГПК.

Метою роботи є визначення поведінки міжшарових гібридних полімерних композиційних матеріалів на основі вугле- та склотканин при статичному розтягу з урахуванням особливостей їх деформування.

Матеріали та методика дослідження. Пластини ГПК виготовлялись з волокнистих армуючих наповнювачів:

- а) односпрямована вуглетканина (густина 200 г/м²), виробник SGL Group;
- б) склотканина EWSF 300-1270 (густина 300 г/м²) з атласним плетінням;
- в) склотканина конструкційна ровінгова STR 022-250 (густина 250 г/м²).

Розкладка шарів – симетрична, укладання – збалансоване (рис. 1).

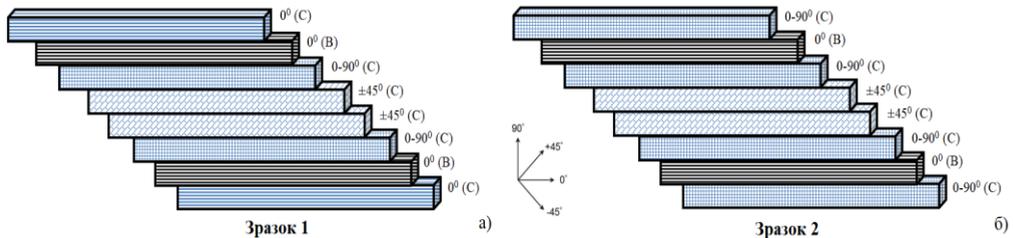


Рис. 1. Схема укладання (послідовності) шарів композиту:

- а) 1, 8 шари – склотканина STR 022-250, 2, 7 шари - односпрямована вуглетканина, 3, 4, 5 та 6 шари – склотканина EWSF 300-1270. Кут укладання шарів: $[0_2/0-90/\pm 45]_s$;
- б) 2, 7 шари - односпрямована вуглетканина, всі інші шари – склотканина EWSF 300-1270. Кут укладання шарів: $[0-90/0/0-90/\pm 45]_s$.

В якості в'язучої суміші для гібридного ГПК використовували епоксидну смолу Epoxy Resin L 20 та затверджувач амінний Härter EPH 161 у співвідношенні 100:25 при змішуванні L 20 : EPH 161 відповідно (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристика компонентів в'язучої суміші

Параметри	Епоксидна смола Epoxy Resin L20	Затверджувач Härter EPH 161
Густина, г/см ³	1.15	0.98
В'язкість, мПа·с	900	150 - 250
Температура спалаху, °С	>120	100 - 115

Послідовність технологічних операцій виготовлення пластин ГПК методом вакуумного формування представлена на рис. 2.



Рис. 2. Технологічний процес виготовлення ГПК:

а) – шаблон для порізки армуючих наповнювачів; б) – укладання шарів скло- та вуглетканини; в) – укладання дренажного склотекстоліту; г) – формування пакету зразків з дренажною трубкою; д) – формування вакуумного мішка; е) – вакуумний мішок в печі; ж) – зовнішній вигляд пластин.

Час формування ГПК (до початку затвердіння), який включає викладку шарів скло- та вуглетканини, формування вакуумного мішка становить 70 хвилин. При перевірці вакуум-лінії і проведенні контролю герметичності вакуумного мішка подальша витримка пластин ГПК під вакуумом становить 20 хвилин при кімнатній температурі. Надалі пластини ГПК витримували в печі під вакуумом 40 хвилин при температурі 40° С та наступні 90 хвилин при температурі 60° С.

Випробування на розтягання зразків проводились у відповідності до міжнародних стандартів ISO 527-1 «Загальні принципи визначення характеристик міцності на розтяг» [14, 15]. Даний метод випробувань визначає характеристики при розтяганні у площині листа композиційних матеріалів з полімерною матрицею, які підсилені високомодульними волокнами. Для випробування зразків при максимальному навантаженні більше 10 кН використовувалась розривна випробувальна машина Р-10 (рис.1) з діапазоном випробувань 0 ÷ 20 кН. Дана випробувальна машина має захвати, які забезпечують можливість обертання відносно осі зразка, що дає можливість мінімізувати згинальні напруження у пакеті гібридного композита.

Границя міцності при розтяганні (tensile strength) σ_{ts} у випробування визначалась за формулою:

$$\sigma_{ts} = \frac{P_{max}}{A}, \quad (1)$$

де P_{max} – максимальне навантаження перед руйнуванням, Н; A – середня площа поперечного перерізу, мм².

Максимальне навантаження P_{max} визначалося з діаграм навантаження (P) – абсолютне подовження зразка (Δl).

Результати досліджень та їх аналіз. В таблиці 2 представлені результати експериментальних досліджень по визначенню руйнівного навантаження при розтягу зразків ГПК (зразки 1.1-1.5 за схемою укладання а) та зразки 2.1-2.5 за

схемою укладання б) на рис.1) та розрахункові значення границі міцності досліджуваних матеріалів.

Таблиця 2

Експериментальні результати при розтягу зразків та їх статистична обробка

№ зразку	Середня площа перерізу зразку, мм ²	Макси-мальне руйнівне навантаження, Н	Границя міцності, МПа	Середнє значення границі міцності, МПа	Середньокв адратичне відхилення, МПа	Коефіцієнт варіації, %
1.1	15,18	10098	665,2	660,7	27,66	4,19
1.2	15,15	10250	676,6			
1.3	15,48	9670	624,7			
1.4	15,34	10656	694,6			
1.5	15,23	9780	642,2			
2.1	16,31	9350	573,3	559,2	9,69	1,73
2.2	16,33	9102	557,4			
2.3	16,9	8930	551,6			
2.4	16,1	8928	554,5			
2.5	16,53	9344	565,3			

Розрахункові показники коефіцієнту варіації свідчать про одноманітність сукупності, репрезентативні результати та високий ступінь надійності обчислення середніх величин в представленому дослідженні.

У ході навантаження деформування композиту супроводжується процесами накопичення пошкоджень та розвитком дефектних структур (розтріскування матриці, розшарування, розрив волокон тощо), що призводить до поступового подовження зразка та руйнування. З діаграм навантаження (P) – абсолютне подовження зразка (Δl) на випробувальній машині Р-10 визначено, що абсолютне подовження зразків першого типу укладання шарів ГПК становило 3,65 мм до дії максимального руйнівного навантаження та 0,99 мм до остаточного руйнування зразку. Для зразків другого типу укладання шарів ГПК абсолютне подовження зразка зменшується, в середньому, на 20% та становить 2,91 мм (при максимальному руйнівному навантаженню) та 0,76 мм (при руйнуванні). При цьому максимальне відносне подовження (ε) зразків 1 та 2 становить 1,88 та 1,47 % відповідно. Оскільки відносне подовження характеризує здатність матеріалу поглинати енергію за рахунок пластичної деформації, то міжшаровий ГПК зразку 1 буде проявляти більшу стійкість в конструкціях, що піддаються ударним навантаженням.

Деформація ГПК при розтягу в поздовжньому напрямку носить складний характер та супроводжується протіканням різних процесів, які домінують на певних стадіях подовження досліджуваного зразка під дією навантаження (рис. 3).

Одержані діаграми деформування зразків ГПК мають нелінійний характер в діапазоні деформування 0,25-0,8% з двома точками розриву зразків. Проаналізуємо механізми деформування та руйнування ГПК в залежності від схеми армування. На першому етапі деформування епоксидна матриця Ероху Resin L 20 забезпечує рівномірний розподіл навантажень в об'ємі ГПК та передачу навантаження матриця-волокно до $\varepsilon = 0,25\%$. Подальше збільшення

навантаження розтягу призводить до нелінійного характеру залежності $\sigma - \varepsilon$ в діапазоні деформування 0,25-0,8%, що обумовлено зростанням концентрації напружень у полімерній матриці, інтенсифікацією пластичних деформацій та деформування матриці, що спричинює утворення мікротріщин в ній, відшарування міжфазної поверхні та передачу навантаження на армуючі волокна (рис. 4).

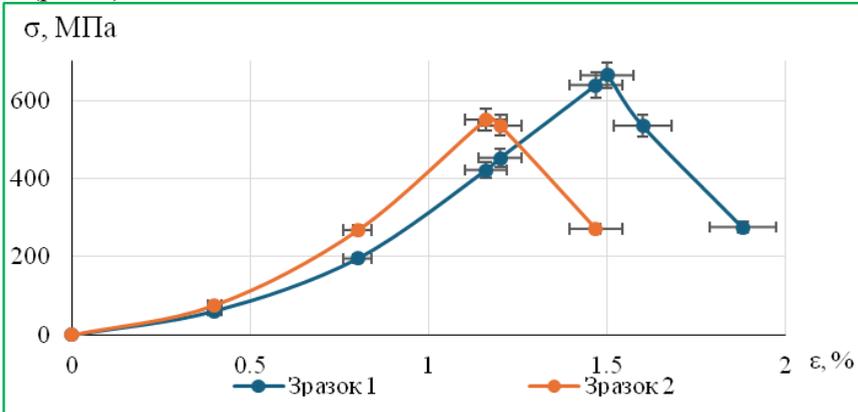
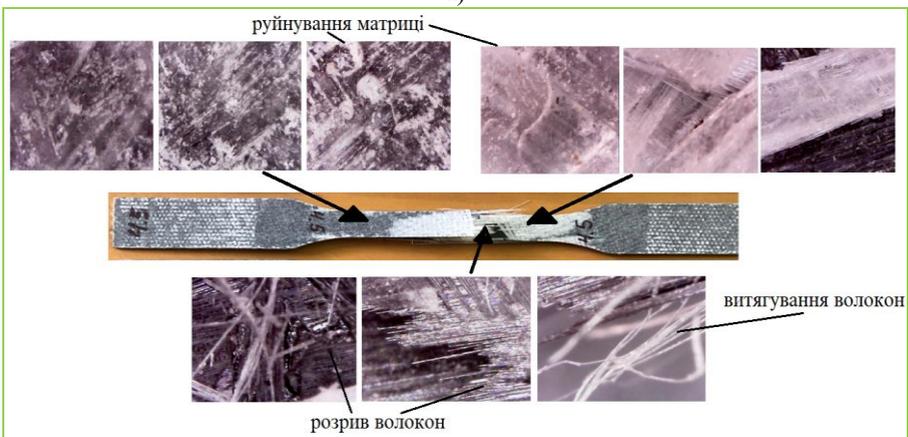
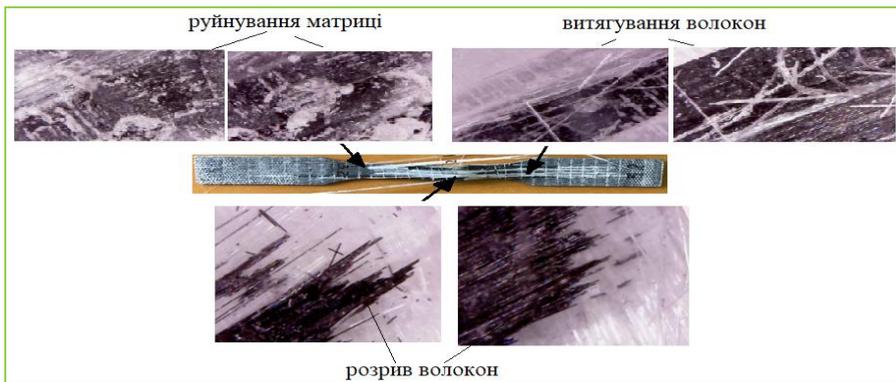


Рис. 3. Діаграма деформування міжшарових ГПК при одноосьовому розтягу: схема укладання шарів композиту зразків 1 та 2 відповідає схемі на рис. 1.



б)

Рис. 4. Стадії руйнування зразків міжшарового ГПК при одноосьовому розтягу: а), б) – схема укладання шарів композиту відповідає схемі на рис. 1.

При подальшому розтягу зразків спостерігається лінійна залежність $\sigma - \varepsilon$ до максимальної границі міцності для зразків 1 і 2, що становить відповідно 660,7 МПа при $\varepsilon = 1,5 \%$ та 559,2 МПа при $\varepsilon = 1,16 \%$. Згідно [16], зі збільшенням напруження відбувається руйнування міжфазної поверхні (наприклад, висмикування волокна та відшарування міжфазної поверхні) або руйнування волокна залежно від міцності на розтяг волокна. Для досліджуваних зразків максимальна границя міцності відповідає першому розриву ГKM, що супроводжується переважно руйнуванням шару односпрямованої вуглетканини. Руйнування вуглетканини характеризувалося крихким плоским розломом волокон, що вказує на те, що вуглецеві волокна витримали більшу частину навантаження до руйнування. Гострі поверхні розломів волокон свідчать про низьку здатність до деформації, що типово для вуглеволокон через їх високу жорсткість та низьке подовження при розриві. Однак, завдяки поглинанню енергії при утворенні початкової тріщини (відшарування міжфазної поверхні та розрив вуглетканини) та розподілу сили між шарами з скловолокна, досліджувані зразки не руйнуються миттєво, а продовжують ще деякий час сприймати навантаження. Після цього зразок розривається вдруге, відносно подовження на 20 % вище, ніж під час першого розриву: ε становить 1,88 та 1,47 % відповідно для зразків 1 і 2.

Другий розрив обумовлений переважно рівномірним витягуванням скловолокна. В досліджуваних ГKM структура зовнішнього шару з скловолокна відіграє вирішальне значення при розриві: для зразку 1 встановлені чіткі ознаки виривання та відшарування волокон, орієнтованих в напрямку навантаження, переважно по всій довжині зразку (рис. 4), що обумовлено орієнтацією волокон склотканини конструкційної ровінгової STR 022-250 паралельно прикладеному навантаженню; в зразку 2 зовнішній шар склотканини EWSF 300-1270 з атласним плетінням забезпечує переважно витягування та руйнування скловолокна переважно в зоні утворення першого розриву.

Оскільки причина вичерпання несучої здатності матеріалу при розтягу в поздовжньому напрямі полягає в розриві волокон [17], використання міжшарових ГKM на основі вугле- та скловолокон підвищує енергоємність руйнування композиту за рахунок перерозподілу навантаження після розриву шару вуглеволокон на частково ушкоджені або неушкоджені шари скловолокна.

Представлені результати визначення міцності досліджуваних ГKM при розтягу аналогічні поведінці руйнування при розтягу міжшарової гібридної структури композиту, наданій в [18], де встановлено, що під час розтягу вуглецеве волокно руйнувалося через низьку деформацію, що пояснюється руйнуванням першого порядку, а скловолокно продовжувало приймати залишкове навантаження та швидко пошкоджувалося через недостатній модуль пружності, що призводило до пошкодження другого порядку.

Таким чином, розробка міжшарових ГKM поєднанням вуглецевого та скловолокна може компенсувати крихкість та низьку ударну стійкість вуглецевого волокна, а також може покращити процеси поглинання енергії за рахунок пластичної деформації скловолокон в структурі гібридного композиту. Перспективи використання ГKM, армованих оптимальною комбінацією тканин з вуглецевих та скляних волокон, ґрунтуються на високій міцності вуглецевих волокон та доступній вартості скляних волокон, що робить їх економічно вигідною та механічно придатною комбінацією для різних умов навантаження.

Висновки

1. Встановлено, що розрив гібридних полімерних композиційних матеріалів на основі вугле- та склотканин при статичному розтягу обумовлений складним багатостадійним процесом руйнування, спричиненим утворенням мікротріщин в полімерній матриці, крихким руйнуванням вуглецевих волокон, перерозподілом напруження на більш пластичні шари скловолокон з подальшим їх руйнуванням за механізмом витягування.

2. Діаграма деформування міжшарових ГПК при одноосьовому розтягу має нелінійний характер, максимальна границя міцності відповідає першому розриву, що супроводжується переважно руйнуванням шару односпрямованої вуглетканини.

3. Формування 8-ми шарового ГПК з двома зовнішніми шарами на основі склотканини конструкційної ровінгової та двома шарами односпрямованої вуглетканини паралельно прикладеному навантаженню та чотирма внутрішньо розташованими шарами склотканини з атласним плетінням забезпечує максимальну границю міцності 660,7 МПа (перший розрив – розрив вуглеволокон), границю міцності на розрив 275,5 МПа (другий розрив – розрив скловолокон) при максимальному відносному подовженні композиту 1,88%.

Список літератури

1. Bukvić M., Milojević S., Gajević S. et al. Production Technologies and Application of Polymer Composites in Engineering: A Review. *Polymers*. 2025. 17(16). 2187. <https://doi.org/10.3390/polym17162187>
2. Koniuszewska A.G., Kaczmar J.W. Application of Polymer Based Composite Materials in Transportation. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*. 2016. 32(1). P. 1-24. doi:[10.1177/147776061603200101](https://doi.org/10.1177/147776061603200101)
3. Rajak D. K., Pagar D. D., Menezes P. L., Linul E. Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Polymers*. 2019. 11(10), 1667. <https://doi.org/10.3390/polym11101667>
4. Campbell F. C. Structural Composite Materials. ASM International, 2010. 612p.
5. Bhagwat P.M., Ramachandran M., Raichurkar P. Mechanical Properties of Hybrid Glass/Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4. Is. 8. P. 7375-7380. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.067>
6. Jagannatha T D., Harish G., Mechanical Properties of Carbon/Glass Fiber Reinforced Epoxy Hybrid Polymer Composites. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2015. Vol.4, No. 2, P. 131-137.
7. Buehler M. J., Rabu P., Taubert A. Advanced Hybrid Materials: Design and Applications. *European Journal of Inorganic Chemistry*. 2012. v. 2012(32). P. 5092. doi. 10.1002/ejic.201201263
8. Rajpurohit A., Joannès S., Singery V. et al. Hybrid Effect in In-Plane Loading of Carbon/Glass Fibre Based Inter- and Intraply Hybrid Composites. *Journal of Composites Science*. 2020. 4(1), 6. <https://doi.org/10.3390/jcs4010006>
9. Dong C. Carbon and glass fibre-reinforced hybrid composites in flexure. *Hybrid Advances*. 2025. Vol. 10. 100471 <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100471>
10. Zhu X., Deng J., Heidari A., Jamei M., Alizadeh A. Mechanical performance evaluation of optimal hybrid composite fabricated with glass and carbon fibers and thermoplastic polypropylene matrix or fencing sports athletes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2025. Vol. 160. 108346. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108346>

11. Alsaadi M., Erkliđ A., Alrawi H. Effect of S-glass fabric on the mechanical characteristics of a hybrid carbon/aramid fabric reinforced epoxy composites. *Materials Research Express*. 2017. Vol. 4 (5). 055304. DOI 10.1088/2053-1591/aa6bab
12. Ramachandran K., Khan M., Perera R. A. T., Jayaseelan D. D. Tensile and flexural behavior of synthetic and hybrid natural fiber composites for lightweight applications. *Polymer Composites*. 2025. 46:S301–S313. <https://doi.org/10.1002/pc.29781>
13. Swolfs Y., Gorbatikh L., Verpoest I. Fibre hybridisation in polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014. 67. P. 181-200 <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.08.027>
14. ISO 527-1:2019(E) Plastics – Determination of tensile properties – Part 1: General principles, 2019. 27p.
15. Мікосянчик О. О., Педан Є. В., Мнацаканов Р. Г. та ін. Аналіз моделей та методів оцінки міцнісних характеристик полімерних композиційних матеріалів. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. 3 (100). С.15-29. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17891](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17891)
16. Huang S., Fu Q., Yan L., Kasal B. Characterization of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials – A critical review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 13. P. 1441-1484. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.076>
17. Композиційні матеріали: Електронний ресурс: навч. наоч. посіб. / О. М. Долгов; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2024. – 126 с.
18. Wu W. Tensile Failure Behaviors and Theories of Carbon/Glass Hybrid Interlayer and Intralayer Composites. *Coatings*. 2023. 13(4). P. 774. <https://doi.org/10.3390/coatings13040774>

Стаття надійшла до редакції 20.11.2025.

Мікосянчик Оксана Олександрівна – докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: okšana.mikos@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>

Шевченко Олег Анатолійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 095 209 00 10, oashev@kai.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7559-0573>

Дубовик Владислав Євгенійович – здобувач вищої освіти освітнього ступеня магістр за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», освітньо-професійна програма «Прикладна механіка, стандартизація та оцінка якості технічних систем», Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: 2551625@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-4435-8465>.

Мнацаканов Степан Рудольфович – здобувач вищої освіти освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка», освітньо-професійна програма «Обладнання повітряних суден», Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: 8388503@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-5416-2714>.

Голембієвський Григорій Григорійович – старший викладач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський авіаційний

інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: hryhorii.holembiievskiy@npp.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2092-9637>

Федорчук Світлана Володимирівна – старший викладач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: svitlana.fedorchuk@npp.kai.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5836-9674>

Oksana Mikosianchyk - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>

Oleh Shevchenko – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State noncommercial enterprise «State University «Kyiv Aviation Institute»», 1 Lubomyra Huzara Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, phone: +38 095 209 00 10, oashev@kai.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7559-0573>

Vladyslav Dubovyk – Master's degree candidate in Higher Education, specializing in 131 "Applied Mechanics", educational-professional program "Applied Mechanics, Standardization, and Quality Assessment of Technical Systems", State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 2551625@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-4435-8465>

Stepan Mnatsakanov – Bachelor's degree candidate in Higher Education, specializing in 134 «Aviation and rocket-space engineering», educational and professional program «Aircraft Equipment», State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 8388503@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-5416-2714>

Grygoriy Golembiyevskyy – Senior Lecturer of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: hryhorii.holembiievskiy@npp.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2092-9637>

Svitlana Fedorchuk – Senior Lecturer of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: svitlana.fedorchuk@npp.kai.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5836-9674>

O. MIKOSIANCHYK, O. SHEVCHENKO, V. DUBOVYK, S. MNATSAKANOV,
G. GOLEMBIYEVSKYY, S. FEDORCHUK

EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF HYBRID COMPOSITE MATERIALS UNDER TENSION

The study investigates the behavior of interlayer hybrid polymer composite materials (HPC) based on carbon and glass fabric under static tension, considering the specific features of their deformation. Hybrid composites based on carbon and glass fabric with different layer stacking schemes by vacuum forming are studied. The results show that the deformation of HPC under tension in the longitudinal direction is complex and is accompanied by the occurrence of various processes that dominate at certain stages of elongation of the studied sample under load. Deformation diagrams for HPC samples were obtained, revealing a nonlinear deformation response in the strain range of 0.25–0.8%. This nonlinearity is attributed to increasing stress concentrations in the polymer matrix, intensified plastic deformation, matrix cracking, interfacial delamination, and load transfer to the reinforcing fibers. Two points of rupture of the samples during uniaxial tension were determined: the first rupture is caused by brittle fracture of carbon fibers, the second rupture is associated with the destruction of glass fibers by the pulling mechanism. The formation of an 8-layer HPC with two outer layers based on structural roving glass fabric and two layers of unidirectional carbon fabric parallel to the applied load and four inner layers of satin weave glass fabric provides a maximum tensile strength of 660.7 MPa (first rupture), a tensile strength of 275.5 MPa (second rupture) with a maximum relative elongation of the composite of 1.88%. The results of the research are relevant in the development of interlayer HPCs by combining carbon and glass fibers in order to achieve high strength of the HPC through carbon fiber and improved energy absorption processes due to plastic deformation of glass fibers in the structure of the hybrid composite.

Keywords: hybrid composite, tensile, deformation, fracture, testing

References

1. Bukvić, M., Milojević, S., Gajević, S., Đorđević, M., & Stojanović, B. Production Technologies and Application of Polymer Composites in Engineering: A Review. *Polymers*. 2025. 17(16). 2187. <https://doi.org/10.3390/polym17162187>
2. Koniuszewska AG, Kaczmar JW. Application of Polymer Based Composite Materials in Transportation. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*. 2016. 32(1). P. 1-24. doi:[10.1177/147776061603200101](https://doi.org/10.1177/147776061603200101)
3. Rajak, D. K., Pagar, D. D., Menezes, P. L., Linul, E. Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Polymers*. 2019. 11(10), 1667. <https://doi.org/10.3390/polym11101667>
4. Campbell F. C. Structural Composite Materials. ASM International, 2010. 612p.
5. Bhagwat P.M., Ramachandran M., Raichurkar P. Mechanical Properties of Hybrid Glass/Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4. Is. 8. P. 7375-7380. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.067>
6. Jagannatha T D., Harish G., Mechanical Properties of Carbon/Glass Fiber Reinforced Epoxy Hybrid Polymer Composites. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2015. Vol.4, No. 2, P. 131-137.
7. Buehler M. J.; Rabu P.; Taubert A. Advanced Hybrid Materials: Design and Applications. *European Journal of Inorganic Chemistry*. 2012. v. 2012, n. 32, P. 5092. doi. 10.1002/ejic.201201263
8. Rajpurohit, A., Joannès, S., Singery, V., Sanial, P., & Laiarinandrasana, L. Hybrid Effect in In-Plane Loading of Carbon/Glass Fibre Based Inter- and Intraply Hybrid Composites. *Journal of Composites Science*. 2020. 4(1), 6. <https://doi.org/10.3390/jcs4010006>

-
9. Dong C. Carbon and glass fibre-reinforced hybrid composites in flexure. *Hybrid Advances*. 2025. Vol. 10. 100471 <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100471>
10. Zhu X., Deng J., Heidari A., Jamei M., Alizadeh A. Mechanical performance evaluation of optimal hybrid composite fabricated with glass and carbon fibers and thermoplastic polypropylene matrix or fencing sports athletes, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2025. Vol. 160. 108346. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108346>
11. Alsaadi M., Erklığ A., Alrawi H. Effect of S-glass fabric on the mechanical characteristics of a hybrid carbon/aramid fabric reinforced epoxy composites. *Materials Research Express*. 2017. Vol. 4 (5). 055304. DOI 10.1088/2053-1591/aa6bab.
12. Ramachandran K., Khan M., Perera R. A. T., Jayaseelan D. D. Tensile and flexural behavior of synthetic and hybrid natural fiber composites for lightweight applications. *Polymer Composites*. 2025;46:S301–S313. <https://doi.org/10.1002/pc.29781>
13. Swolfs Y., Gorbatiikh L., Verpoest I. Fibre hybridisation in polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014. 67. P. 181-200 <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.08.027>
14. ISO 527-1:2019(E) Plastics — Determination of tensile properties — Part 1: General principles, 2019. 27c.
15. Mikosianchyk O. O., Pedan Y. V., Mnatsakanov R. G. et al. Analysis of models and methods for assessing the strength characteristics of polymer composite materials. *Problems of friction and wear*. 2023. 3 (100). C.15-29. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17891](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17891)
16. Huang S., Fu Q., Yan L., Kasal B. Characterization of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials – A critical review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 13. P. 1441-1484. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.076>
17. Композитні матеріали : Електронні ресурс : навч. наоч. посіб. / О. М. Долгов ; М-во освіти і науки України, Навч. центр «Дніпровська політехніка». – Дніпро : NTU «Дніпровська політехніка», 2024. – 126 с.
18. Wu W. Tensile Failure Behaviors and Theories of Carbon/Glass Hybrid Interlayer and Intralayer Composites. *Coatings*. 2023. 13(4). P. 774. <https://doi.org/10.3390/coatings13040774>