

УДК 005.6:631.11

DOI: 10.18372/0370-2197.3(100).17891

*О. О. МІКОСЯНЧИК, Є. В. ПЕДАН, Р. Г. МНАЦАКАНОВ, А. М. ХІМКО,
С. Ю. БОГДАН, К. С. ЧАВА*

Національний авіаційний університет, Україна

АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ОЦІНКИ МІЦНІСТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Обґрунтовано доцільність поєднання комплексних систем проектування та проведення стандартизованих механічних випробувань при розробці нових композиційних матеріалів з метою підвищення надійності виробів та конструкцій. Проведено аналіз сучасних програмних комплексів скінченно-елементного аналізу SolidWorks, ANSYS, Abaqus та Patran/Nastran та розглянуто потенційні механізми руйнування при моделюванні властивостей композиційних матеріалів. Проаналізовано методи механічних випробувань композиційних матеріалів, умови та процедуру проведення випробувань за стандартами ISO та ASTM. Аргументована процедура створення нормативно-технічної бази у сфері виробництва та застосування композиційних матеріалів.

Ключові слова: *композиційні матеріали, методи випробувань, стандартизація, моделювання, критерії руйнування.*

Вступ. Однією з найважливіших переваг композиційних матеріалів (КМ), що забезпечило їм ефективне застосування в різних галузях техніки, – можливість управління структурою матеріалу в залежності від конфігурації і характеру навантаження конкретного виробу. При цьому управління структурою матеріалу у виробі включає вибір відповідних компонентів, завдання оптимального ступеня наповнення, взаємного розташування і орієнтації армуючих наповнювачів відповідно до полів напружень, що діють у виробі при експлуатації. Композитні матеріали є складними структурами, які складаються з двох або більше компонентів, які мають різну фізичну та хімічну природу. Механічні властивості композиційних матеріалів залежать від властивостей їх компонентів, а також від їх структури та способу виготовлення.

Оскільки сам матеріал і його структура формуються тільки при виготовленні виробу, а виготовлення виробів з різними варіантами структури пов'язане зі значними витратами часу і коштів, то неминує виникати завдання визначення властивостей матеріалу, необхідних для розрахунку виробу та оптимізації структури матеріалу в ньому, ще на стадії лабораторних досліджень. Механічні випробування композитних матеріалів є важливим етапом в дослідженні їх властивостей. Ці випробування дозволяють визначити міцність, жорсткість, деформаційні властивості та інші параметри композитів.

Незважаючи на переваги та ефективні властивості армованих волокном полімерів, такі як високе співвідношення міцності до ваги або стійкість до пошкоджень, ці матеріали зазвичай характеризуються широким діапазоном мінливості своїх механічних властивостей. Ці відхилення здебільшого виникають через виробничі дефекти і недосконалість, такі як неспіввісність волокон, неоднорідна об'ємна частка волокон і локальні тріщини [1]. Навіть сучасні автоматизовані виробничі процеси, такі як автоматичне розміщення волокон або

укладання стрічки, спричинюють дефекти, що призводять до широкого діапазону механічних властивостей кінцевого виробу з композиційних матеріалів.

Для сертифікації композитів, які використовуються в конструкціях аерокосмічної галузі, необхідно розробити підхід, заснований на проведенні комплексних і дорогих випробувань, щоб гарантувати безпечне та надійне використання композитних конструкцій та отримати статистично значущі властивості. Розробка алгоритму таких випробувань із застосуванням як механічних випробувань, так і комплексних систем проектування, дозволить підвищити надійність оцінки довірчих інтервалів для врахування невизначеностей та факторів безпеки [2].

Існуючий досвід створення конструкцій з полімерних композиційних матеріалів вказує на підвищений розкид таких параметрів, як жорсткість та міцність, що обумовлено нестабільністю вихідних компонентів, відхиленням у виконанні технологічних процесів та ін. Ці фактори враховуються введенням додаткового коефіцієнта безпеки при визначенні розрахункового навантаження, величина якого залежить від коефіцієнта варіації механічних властивостей виробів з композиційних матеріалів.

Таким чином, якісний вибір методів механічних випробувань композиційних матеріалів та удосконалення методик проведення випробувань дозволить з високою надійністю прогнозувати основні механізми руйнування та міцність композиційних матеріалів.

Мета роботи – провести оцінку розрахункових програмних комплексів та стандартів на механічні випробування при аналізі міцності виробів з КМ для визначення значимих критеріїв при прогнозуванні міцнісних характеристик КМ.

Способи моделювання конструкцій з полімерних композиційних матеріалів. Полімерні композиційні матеріали (ПКМ), які характеризуються високими механічними та міцнісними характеристиками, являються ефективною альтернативою монолітним матеріалам для багатьох інженерних розробок. Незважаючи на те, що ПКМ широко застосовуються при створенні конструкцій різного призначення, питання адекватного моделювання процесів деформування та руйнування таких виробів залишається актуальним в задачах механіки деформованого тіла. Моделювання зазначених процесів ускладнюється тим, що руйнування ПКМ являється багатостадійним та багатофакторним процесом, що охоплює різні масштабні та структурні рівні матеріалу [3].

Сучасна оцінка надійності виробів з ПКМ ґрунтується на застосуванні багатьох моделей їх руйнування. Головною метою якісного прогнозування механічних властивостей ПКМ є розробка математичного апарату, на основі якого можливо передбачити основні механізми руйнування та міцність композитів за статистичними характеристиками властивостей наповнювача, матриці, адгезійної та когезійної міцностей, розмірами виробу та ін. Останні досягнення в галузі програмного проектування відкривають нові можливості для більш швидкого прогнозування структурної реакції композитних матеріалів та їх оптимізації.

Для аналізу міцності конструкцій широко застосовують різні розрахункові програмні комплекси. В даних комплексах використовується метод скінченних елементів (МСЕ), який дозволяє побудувати математичну модель з якоюсь ідеалізацією, що відповідає реальній конструкції, і по прикладним до неї навантаженням і граничним умовам отримати розподіл полів напружень і

деформацій. З урахуванням отриманих результатів роблять висновки про виконання умови міцності [4]. Найбільш простий розрахунковий випадок - однорідний матеріал. Однак в даний час велика кількість деталей створюють з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), які складаються з різномірних компонентів, що володіють індивідуальними властивостями і особливостями – матриця служить сполучною основою, а армуючі наповнювачі мають високу міцність.

Для моделювання конструкцій з ПКМ застосовують кілька основних способів: структурний (розглядається структура матеріалу і мікромеханічна взаємодія між окремими елементами компонентів при навантаженні всієї конструкції), феноменологічний (неоднорідний ПКМ розглядається як усереднений суцільний матеріал – однорідний анізотропний), комбінований або структурно-феноменологічний спосіб (комбінація попередніх двох методів, де ідеалізовано отримують макроскопічну оцінку властивостей гетерогенних систем через фізико-механічні властивості складових даної системи фаз).

На рис. 1 наведено один з прикладів багатошарового ПКМ, що складається з n різноспрямованих шарів (рис. 1, *a*). На рис. 1, *б* наведено тривимірний елементарний об'єм з моношару з компонентами тензора напружень, що діють в ньому. Символом \parallel позначені осі, компоненти тензорів і подібні векторні величини, що збігаються з напрямком волокон, символом \perp – перпендикулярні. Спільне використання даних символів вказує на зсувні компоненти. На рис. 1, *в* наводиться двовірний елементарний об'єм моношару для плосконапруженого стану пластин і оболонок.

При аналізі міцності багатошарових оболонок, згідно структурно-феноменологічного методу, спочатку отримують усереднені фізико-механічні характеристики, після чого відбувається розрахунок конструкції, що складається з оболонок; потім за допомогою математичної моделі визначають розподіл напружень і деформацій в конструкції. Після чого через дробові співвідношення переходять від усереднених деформацій і напружень в композитних оболонках до напружень і деформацій в кожному моношарі ПКМ – на основі його властивостей, орієнтації волокон, товщини і положення в пакеті. На завершальному етапі на підставі отриманих значень за допомогою обраного критерію руйнування робиться висновок про міцність моношару.

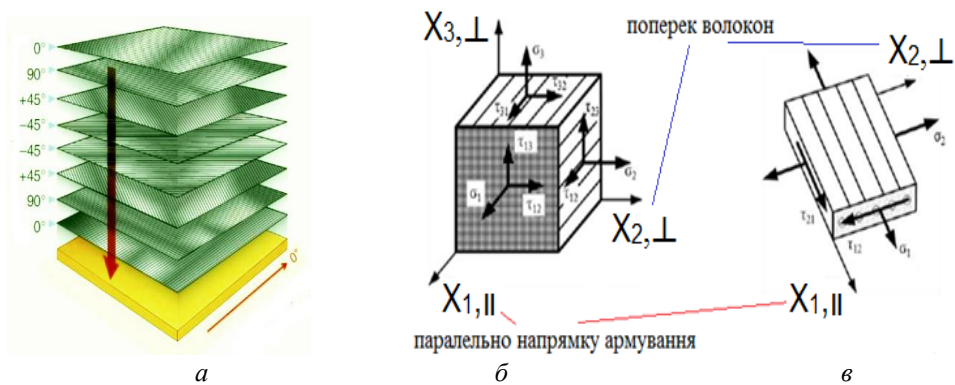


Рис. 1. Схема полімерного композиційного матеріалу (ПКМ): *a* – багатошаровий пакет; *б* – тривимірний елементарний об'єм; *в* – плоский елементарний об'єм ПКМ

В даний час існує велика кількість критеріїв руйнування анізотропних тіл, які використовуються в програмних продуктах скінченно-елементного аналізу. Всі вони ґрунтуються на зв'язку значень тензора напружень і / або деформацій і в них розглядається руйнування окремого шару, пов'язане з початком руйнування всієї конструкції. Розробниками може бути модифікований або змінений будь-який критерій зі збереженням вихідної назви, що призводить до необхідності при застосуванні розрахункових програмних комплексів упевнитися в точності формулювань в супровідній довідниковій документації [5-7].

Проаналізуємо основні критерії руйнування в сучасних програмних комплексах при моделюванні властивостей композиційних матеріалів.

В програмному забезпеченні SolidWorks руйнування композиційного матеріалу проявляється у кілька етапів [8]. При достатньо високому напруженні першого шару (FPF) або першої групи шарів відбувається їх руйнування. Етап загального руйнування шарів називається критичним руйнуванням шаруватого матеріалу (ULF). В SolidWorks застосовують критерій максимального напруження, критерій руйнування Tsai-Hill та критерій Tsai-Wu.

Критерій максимального напруження застосовується для композиційних оболонок. Згідно з цим критерієм, руйнування з'являється, коли напруження в одному з основних напрямків матеріалу перевищує міцність у цьому напрямку. Програма приймає стан напруження на площині (допущення 2D) для шаруватих матеріалів з параметрами $\sigma_3 = 0$, $\tau_{13} = 0$, $\tau_{23} = 0$. Також для композиційних оболонок застосовується критерій руйнування Tsai-Hill, який враховує енергію формозміни із сумарної енергії деформації, яка накопичується внаслідок навантаження. Для 2D шаруватого матеріалу, який застосовується для композиційних оболонок, кожен шар сприймається таким, що перебуває в стані напруження площини з параметрами $\sigma_3 = 0$, $\tau_{13} = 0$, $\tau_{23} = 0$.

Для визначення запасу міцності композиційних ортотропних оболонок застосовується критерій Tsai-Wu, який враховує сумарну енергію деформації (енергія формозміни та енергію розширення) для прогнозування руйнувань. Цей критерій більш повний, ніж критерій руйнування Tsai-Hill, оскільки він розрізняє межі міцності на стиск і розтяг. Слід зазначити, що критерій руйнування Tsai-Wu не прогнозує різних форм руйнувань, включаючи руйнування волокон, матриці та волоконно-матричного сполучення.

В роботах [9, 10] із застосуванням Solid Works представлено скінченно-елементні моделі волоконно-зміцненого полімерного композиційного елемента як характерної частини шаруватих конструкцій з метою їх адаптації до розробленої методики розрахунків елементів конструкцій як багатошарових ортотропних тіл та порівняльного аналізу отриманих результатів з експериментальними. При розробці моделей розрахунку шаруватих композитних конструкцій на руйнування враховуна складна структура багатошарових композиційних матеріалів та застосовуються фізико-механічні характеристики композиційних матеріалів, отримані шляхом проведення експериментальних досліджень на зразках, виготовлених методом автоклавної формовки та термовакuumним методом за міжнародними стандартами.

В сучасному інженерному проектуванні широко застосовується програмне забезпечення ANSYS [10]. Рішення ANSYS для моделювання конструкцій з композиційних матеріалів (ANSYS Composite PrepPost) дає можливість моделювати складні конструкції, дозволяючи оцінити потенційні механізми руйнування,

включаючи розвиток пошкоджень, розшарування та утворення тріщини. Інтерфейс ANSYS Composite PrepPost дозволяє обрати матеріали багат шаровій конструкції, визначити положення та послідовність укладання шарів (рис. 2).

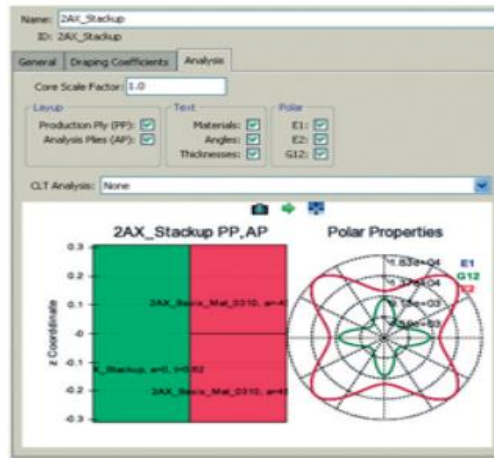


Рис. 2. Інтерфейс ANSYS Composite PrepPost при багат шаровому укладанні армуючого матеріалу [9]

Поведінка композитів, як правило, описується моделлю ортотропного або анізотропного матеріалу. Шаруваті елементи в ANSYS, крім цих, підтримують різні моделі гіперпружних матеріалів. Розшарування в результаті дії зусиль поперечного зсуву і розтягування може бути змодельовано, виходячи з величини міжшарових дотичних напружень. Для передбачення міцності використовуються критерії максимальних напружень і деформацій, Цзя-Бу (Tsai–Wu), Цзя-Хілла (Tsai–Hill), Хашина (Hashin), критерій Langley Research Center (LaRC), критерії Кунце та Пака (Puck) при 2-D та 3-D моделюванні. Технології ANSYS дозволяють моделювати явища на рівні мікромеханіки композитів, пов'язані з руйнуванням на межі розділу між волокном та сполучником, використовуючи спеціальні моделі та характеристики когезійної зони.

Критерії пошкодження в пакеті програмного забезпечення кінцевих елементів Abaqus [11] – це математичні вирази або алгоритми, що використовуються для прогнозування виникнення та прогресування пошкоджень композиційних матеріалів та конструкцій. Ці критерії ґрунтуються на принципах механіки суцільного середовища та враховують вплив різних типів ушкоджень, таких як розтріскування, утворення порожнин та деградація матеріалу, на механічну поведінку матеріалу.

Критерії пошкодження Abaqus включають модель Джонсона-Кука (модель пошкодження, яка поєднує в собі критерій руйнування та модель пластичності для моделювання поведінки матеріалів, що піддаються впливу високих температур та швидкостей деформації), модель Русселе (модель механіки суцільного руйнування для пластичного пористого матеріалу), модель Кокрофта-Латама (чисельне моделювання на стиск) та модель Мора-Кулона (заснована на оцінці максимального напруження зсуву). Ці критерії враховують такі фактори, як напруга, деформація та швидкість деформації, та калібруються з використанням експериментальних даних для точного опису властивостей конкретних матеріалів.

Для оцінки руйнування композиційних конструкцій програмне забезпечення Abaqus використовує критерій Пака (прогнозує руйнування при певному рівні стиснення, коли максимальна гідростатична напружка в матеріалі перевищує певну межу), критерій Цай-Ву (критерій руйнування композиційних матеріалів, що враховує як компоненти напруження, так і деформації, і прогнозує руйнування, коли сукупні компоненти напруження та деформації виходять за певну межу, зважаючи на властивості та орієнтацію матеріалу), критерій Хашина (прогнозує руйнування, коли напруження та деформації в матеріалі перевищують певні порогові значення, враховуючи властивості волокна та матриці).

Застосовуючи дослідження на міцність композиційних конструкцій з використанням CAE-системи MSC.Patran/Nastran можна пов'язати мікромеханічні властивості ПКМ із їх макроскопічними характеристиками. У MSC.Patran/Nastran ініціювання пошкодження може бути визначено за максимальним напруженням/деформацією, критеріями Хілла, Хоффмана, Цай-Ву, Хашина та Пака [12]. Дослідження крайових ефектів у шаруватих композитах, моделі сумісності при зміщенні, моделі зчеплення, лінеаризовані тривимірні критерії руйнування та інші моделі руйнування зі швидкістю виділення енергії, метод віртуального закриття тріщини дають можливість розрахувати стійкість до пошкоджень ламінованих композиційних конструкцій. Слід зазначити, що моделі, що використовують теорію Хілла, теорію Цай-Ву та теорію Хоффмана, розглядають взаємодію поздовжніх/поперечних (трансверсальних) напружень/деформацій для прогнозування руйнування [13].

Слід зазначити, що крім програмних МСЕ-пакетів, в яких здійснюється побудова моделі конструкції з композиційних матеріалів та аналіз її міцності за наявними критеріями, також існують окремі програмні продукти, в яких відсутня можливість побудови моделей, але вони використовуються для спеціалізованого аналізу скінченно-елементних моделей для інших програмних комплексів. У таких спеціалізованих програмах кількість пропонованих для аналізу критеріїв оцінки міцнісних характеристик конструкцій з ПКМ досить значна, що дозволяє користувачеві вибрати найбільш оптимальний варіант прогнозування.

Аналіз стандартів ISO та ASTM на механічні випробування композиційних матеріалів. Композитні матеріали можна розглядати та аналізувати на різних рівнях і в різних масштабах, залежно від конкретних характеристик і умов. Наприклад, мікромеханіка досліджує взаємодію компонентів на мікроскопічному рівні, такі як пошкодження волокон (розтягнення, вигин, розколвання), руйнування матриці (розтягнення, стиск, зсув) і адгезійна міцність (розклеювання), що особливо важливо у вивченні таких властивостей, як механізми руйнування та міцність, в'язкість до руйнування та довговічність ПКМ при втомі. Макромеханічний аналіз рекомендовано застосовувати на рівні ламінату (багатошарового укладання) з метою обчислення ефективних характеристик виробу з КМ за заданими характеристиками компонентів.

Методи механічних випробувань КМ є важливим інструментом для вивчення їх міцності, пластичності, жорсткості та інших властивостей [14]. До основних методів механічних випробувань КМ належать: визначення міцності матеріалу при розтягуванні (tensile testing), при згині (flexural testing), при крутінні (torsion testing), при ударі (impact testing), при стисканні (compression testing) та ін. (рис. 3). Всі зазначені види випробувань проводять до руйнування досліджуваного зразка. Крім того, існують інші методи механічних випробувань, до яких можна віднести випробування на знос, дослідження на зміну форми та зміну розміру КМ, випробування на втомну міцність та ін.

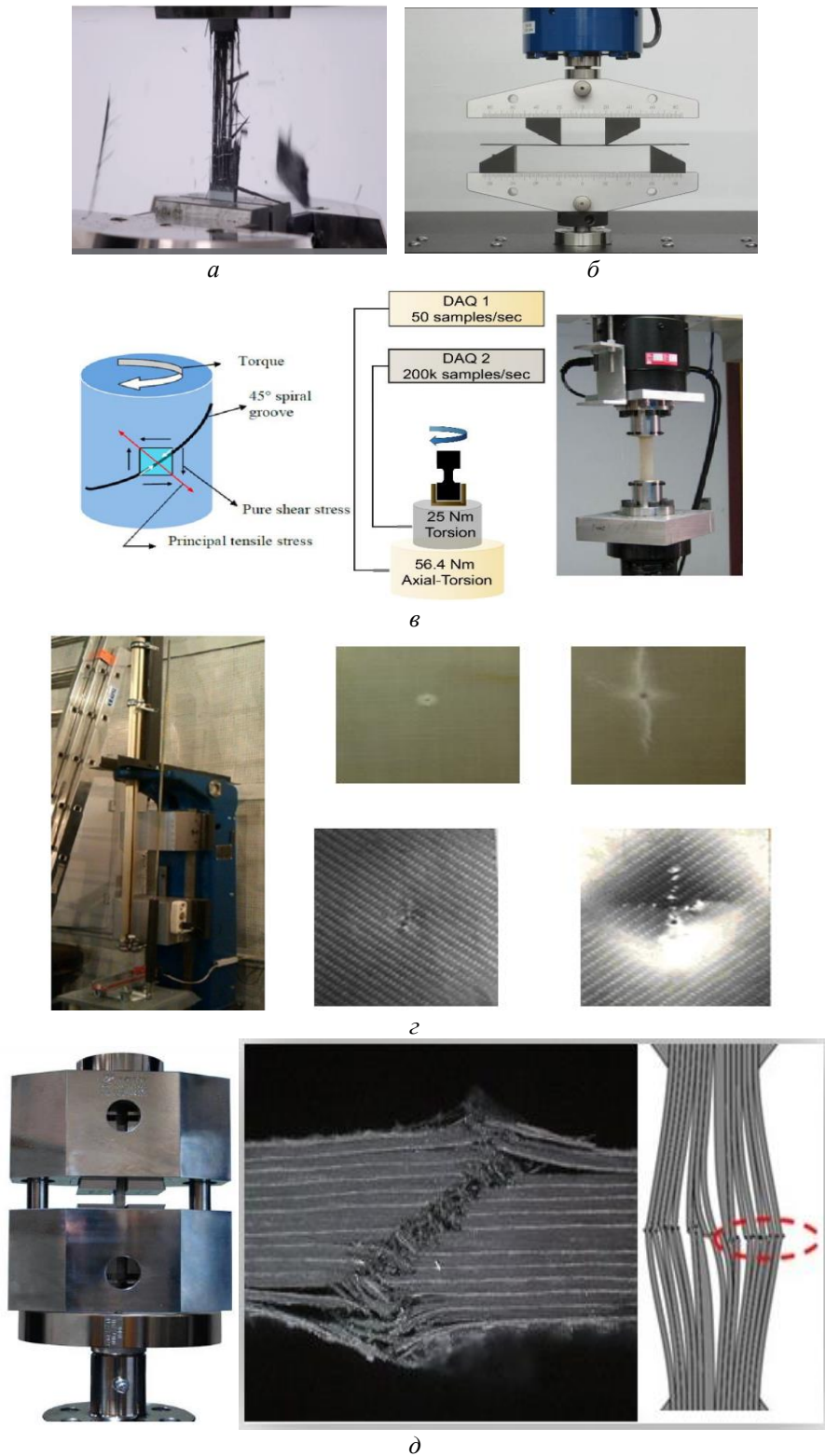


Рис. 3. Методи механічних випробувань композиційних матеріалів при розтягуванні (а), при згині (б), при крутінні (в) [15], при ударі (г) [16], при стисканні (д) [17].

Умови застосування зазначених методів механічних випробувань регламентовані низкою стандартів, які включають умови та процедуру проведення випробувань. В представленій роботі проаналізовано основні методи випробувань полімерів та ПКМ при розтягуванні та стисканні (табл. 1).

Таблиця 1

Основні аспекти методик досліджень та визначення властивостей композиційних матеріалів за стандартами ISO та ASTM

Стандарт	Тип матеріалу для випробувань	Методика випробувань	Результати тестування
Механічні випробування при розтягуванні			
ISO 527-1:2012 "Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 1: General principles" (Пластмаси. Визначення властивостей під час розтягування. Частина 1. Загальні принципи)	Тверді й напівтверді пресовані, екструзійні та литі термопластичні матеріали, зокрема наповнені й армовані сполуки; тверді та напівтверді термореактивні пресовані матеріали, зокрема наповнені й армовані компаунди; тверді та напівтверді термореактивні листи, охоплюючи ламінати; армовані волокном термореактивні й термопластичні композиційні матеріали, що містять орієнтоване або неорієнтоване армування, таке як сітки, тканини, сплетені скловолокна, рублені частки, комбіноване та змішане армування скловолокном та подрібненими волокнами; лист, виготовлений з попередньо просочених матеріалів (препрегів); термотропні рідко-кристалічні полімери.	Стандарт описує процедуру випробування на розтягнення, включаючи спосіб навантаження, фіксацію проби та вимірювання деформації та сили.	Міцність на розтягування, ступінь деформації, модуль пружності, відносне подовження, коефіцієнт Пуассона.
ISO 527-2:2012 "Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics" (Пластмаси: визначення властивостей під час розтягування. Частина 2. Умови випробування для пластмас, виготовлених методом формування та екструзії)	Тверді та напівтверді термопластичні матеріали, виготовлені методом формування, екструзії та литтям, охоплюючи сполуки, наповнені та армовані, наприклад короткими волокнами, дрібними стрижнями, пластинками чи гранулами; тверді та напівтверді термореактивні матеріали, виготовлені формуванням та литтям, охоплюючи наповнені та армовані сполуки; термотропні рідкі кристалічні полімери.	Стандарт встановлює спеціальні умови випробування, які враховують особливості литих і екструзійних пластикових матеріалів: вимоги до швидкості навантаження, температури випробування, умов вологості та інших параметрів, які можуть впливати на результати випробування	Міцність на розтягування, модуль пружності, відносне подовження, коефіцієнт Пуассона.

<p>ISO 6721-4:2019 Plastics — Determination of dynamic mechanical properties — Part 4: Tensile vibration — Non-resonance method (Пластмаси - Визначення динамічних властивостей - Частина 4: Вібрація на розтяг - нерезонансний метод)</p>	<p>Метод рекомендовано для визначення динамічного модуля пружності (від 0,01 до 5 ГПа) для полімерів та полімерів, армованих волокнами.</p>	<p>Стандарт описує примусовий нерезонансний метод для визначення складових модулів пружності (E) полімерів переважно на частотах у діапазоні від 0,01 Гц до 100 Гц.</p>	<p>Визначення комплексного модуля на розтягування (E') полімерів при частотах в діапазоні від 0,01 до 100 Гц. Вимірювання тангенсу кута механічних втрат більше 0,1, вивчення залежності динамічних властивостей від температури та частоти в діапазоні склування.</p>
<p>ASTM D3039 / D3039M - Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials (Стандартний метод визначення механічних властивостей при випробуванні на розтягування композитних матеріалів з полімерною матрицею)</p>	<p>ПКМ, армовані вуглецевими, борними, органічними та іншими високоміцними волокнами.</p>	<p>Метод випробування полягає у розтягуванні зразка ПКМ з постійною швидкістю навантаження або деформування до моменту розриву. Випробування проводять в умовах нормальній, низькій та підвищеній температурі.</p>	<p>Модуль пружності, міцність при розтягуванні, подовження при руйнуванні, коефіцієнт Пуассона, деформацію переходу (для білінійної діаграми).</p>
<p>ASTM D638 / D638M - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (Властивості пластмас при розтягуванні)</p>	<p>Армовані та неармовані пластичні матеріали</p>	<p>Для випробувань на подовження стандарт встановлює вимоги до форми гантелі з довжиною 25 мм або 50 мм; рекомендована довжина 50 мм. Можливо проводити дослідження зразків в термокамері при температурі - 80...+250 °С.</p>	<p>Напруження розтягування, деформація, модуль пружності, міцність при розтягуванні, точка плинності та точка руйнування, коефіцієнт Пуассона.</p>
<p>ISO 14130:1997 Fibre-reinforced plastic composites - Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method (Армовані</p>	<p>Багатошарові термопласти або реактопласти, армовані збалансовано та симетрично розташованими щодо середньої площини зразка волокнами.</p>	<p>Випробування проводять на випробувальних машинах з навантажуючим наконечником (радіус 5,0±0,2 мм)</p>	<p>Уявне напруження при міжшаровому зсуві, уявна межа міцності при міжшаровому зсуві.</p>

волоконном ПКМ. Визначення уявної міжшарової міцності на зсув методом випробування балочок)		та опорами (радіус $2,0 \pm 0,2$ мм), що забезпечують розтягування зразка із заданою постійною швидкістю та вимірювання навантаження.	
ASTM D2344 / D2344M Standard Test Method for ShortrBeam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates (Стандартний метод випробування на міцність короткої балки. ПКМ та їх ламінати)	Високомодульні композиційні матеріали, армовані волокнами.	Зразок являє собою коротку балку, виточену з вигнутого або плоского ламінату товщиною до 6,00 мм. Балка навантажується в триточковому згині.	Уявна міжшарова міцність на зсув паралельно армованих волоконном пластиків
Механічні випробування при стисканні			
ISO 14126:1999 "Fibre-reinforced plastic composites – Determination of compressive properties in the in-plane direction" (Армовані волоконном пластиком композити – Визначення властивостей при плоскому стисканні).	Армовані волокнами термопластичні і термореактивні пластиком композити; неармовані та наповнені частинками пластики, а також армовані короткими волокнами (менше 1 мм завдовжки)	В стандарті зазначаються вимоги до розмірів зразків та умов проведення випробувань. Для анізотропних пластмас, армованих волоконном, необхідно випробувати тстовні зразки в двох основних напрямках анізотропії.	Міцність односпрямованого шару ПКМ при стисканні вздовж волокон, міцність односпрямованого шару ПКМ при стисканні поперек волокон, міцність односпрямованого шару ПКМ при зсуві в площині шару.
ASTM D6641 / D6641M - Standard Test Method for Determining the Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Laminate Plates (Стандартний метод випробувань для визначення властивостей стиску композитних ламінатних плит з полімерною матрицею)	Шаруваті пластики з поперечною та квазіізотропною укладкою, тканинні композити, композити з рубленими армуючими волокнами та інші матеріали з аналогічною або більш низькою міцністю.	Стандарт регламентує умови до обладнання для створення комбінованого навантаження на зразок.	Граничне напруження при стиску, модуль пружності та коефіцієнт Пуассона при стиску

Створення та розвиток нормативно-технічної бази з випробувань полімерних композиційних матеріалів процес тривалий і не може вважатися завершеним із випуском певної кількості стандартів. Необхідний їх постійний супровід, перегляд та покращення. В Законі України «Про стандартизацію» від 03.01.2015 року передбачено наближення національної системи стандартизації до міжнародних і європейських норм та правил. Відповідно до Закону «Про стандартизацію» до основних повноважень національного органу стандартизації Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ») належить життя заходів щодо гармонізації національних стандартів та кодексів усталеної

практики з відповідними міжнародними, регіональними стандартами та кодексами; забезпечення адаптації національних стандартів та кодексів усталеної практики до сучасних досягнень науки і техніки.

Процедура створення повноцінної нормативно-технічної бази у сфері виробництва та застосування ПКМ являється першочерговою складовою розробки нових матеріалів, підвищення їх якості та конкурентоспроможності виробів з ПКМ. Насамперед, це стосується частини стандартів із механічних випробувань та оцінки якості ПКМ, оскільки питання відтворюваності параметрів тестування та достовірності одержаних результатів є передумовою для коректного порівняння властивостей ПКМ. Наприклад, проаналізовані в таблиці 1 стандарти ISO 527-1:2012 та ISO 527-2:2012 не являються аналогами стандартів ASTM D3039 / D3039M та ASTM D638 / D638M, оскільки використовують для досліджень різні форми та розміри зразків, методику проведення випробувань та оцінку результатів досліджень. З проаналізованих згідно таблиці 1 стандартів в Україні чинні лише два аналоги: ДСТУ EN ISO 527-1:2017 Пластмаси. Визначення властивостей під час розтягування. Частина 1. Загальні принципи (EN ISO 527-1:2012, IDT; ISO 527-1:2012, IDT), який затверджено згідно наказу від 06.12.2017 № 399 Про прийняття національних нормативних документів, гармонізованих з європейськими та міжнародними нормативними документами, скасування національних нормативних документів та ДСТУ EN ISO 527-2:2018 Пластмаси. Визначення властивостей під час розтягування. Частина 2. Умови випробування для пластмас, виготовлених методом формування та екструзії (EN ISO 527-2:2012, IDT; ISO 527-2:2012, IDT), що затверджено згідно наказу від 05.11.2018 № 394 Про прийняття та скасування національних нормативних документів, скасування зміни до національного нормативного документа. Однак, при гармонізації вітчизняних стандартів з європейськими та міжнародними нормативними документами виникають труднощі та протиріччя в термінології. Зокрема, проведений аналіз стандартів виявив несистемність вживання термінів композит / композитний матеріал / композиційний матеріал або пластики / пластмаси / пластичні матеріали та ін.

Загалом, проведений аналіз способів моделювання та методик досліджень і визначення властивостей полімерних композиційних матеріалів показав перспективи створення широкого спектру нових матеріалів, які перевершать традиційні матеріали та сплави за своїми механічними властивостями.

Висновки. Проаналізовані основні критерії руйнування в сучасних програмних комплексах скінченно-елементного аналізу SolidWorks, ANSYS, Abaqus та Patran/Nastran при моделюванні властивостей композиційних матеріалів. Визначено особливості прогнозування різних форм руйнувань ПКМ, оцінки потенційних механізмів руйнування, моделі пошкодження ПКМ залежно від застосованого програмного комплексу при проектуванні виробів з композиційних матеріалів.

Розглянуто основні аспекти методик досліджень та визначення механічних властивостей композиційних матеріалів при розтягуванні та стисканні за стандартами ISO та ASTM. Проаналізована процедура створення нормативно-технічної бази у сфері виробництва та застосування ПКМ з позицій наближення національної системи стандартизації до міжнародних і європейських норм та правил.

Список літератури

1. Woigk W., Hallett S.R., Jones M.I., Kuhtz M., Hornig A., Gude M. Experimental investigation of the effect of defects in automated fibre placement produced composite laminates. *Composite Structures*. 2018. Vol. 201. P. 1004-1017.
2. Furtado C., Pereira L., Tavares R., Salgado M., Otero F., Catalanotti G., et al. A methodology to generate design allowables of composite laminates using machine learning. *International Journal of Solids and Structures*. 2021. Vol. 233. Article 111095.
3. Li S., Thouless M.D., Waas A.M. et al. Use of a cohesive-zone model to analyze the fracture of a fiber-reinforced polymer-matrix composite. *Composites Science and Technology*. 2005. 65. P.537-549.
4. Grinevich, D.V., Nuzhnyi, G.A., Buznik, V.M. et al. Destruction of Reinforced Ice Composition Materials upon Bending Mechanical Loading. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020. Vol. 11. P. 941–946.
5. Mascia N. T., Simoni R. A. Analysis of failure criteria applied to wood. *Engineering Failure Analysis*. 2013. Vol. 35. P. 703-712.
6. Grinevich D.V., Yakovlev N.O., Slavin A.V., Lashov O.A. Peculiarities of modeling the delamination of polymer composite materials during separation. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*. 2022. 1. P. 2–10.
7. Dzierwa A., Stelmach N. Analysis of strength criteria in the design of products from composite materials. *Вісник КПІ. Серія Приладобудування*. 2020. Вип. 59(1). С. 46-50.
8. Критерий разрушения для композитных материалов. URL: <https://help.solidworks.com/> (дата звернення: 07.09.2023).
9. Astanin V., Bogdan S. Finite Element Model of Laminated Shells of Composite Materials. *Strength of materials*. 2021. Т. 53, вип. 2. С. 265 – 271.
10. Astanin V., Bogdan S. Strength of the Layered Cylindrical Shell of Composites Under Internal Pressure with Regard to External Damage. *Strength of materials*. 2021. Т. 53, вип. 3. С. 423 – 429.
11. Композиційні матеріали. URL: https://www.tpolis.com/ansys/files/ansys_composite.pdf (дата звернення: 07.09.2023).
12. Abaqus Damage criteria. URL: https://caeassistant.com/fracture_damage/ (дата звернення: 07.09.2023).
11. Reiner J., Vaziri R. Structural Analysis of Composites With Finite Element Codes: An Overview of Commonly Used Computational Methods. *Comprehensive Composite Materials II*. 2018. Vol. 8. P. 61-84.
13. Becker W., Jin P.P., Neuser P. Interlaminar stresses at the free corners of a laminate. *Composite Structures*. 1999. Vol. 45, Is. 2. P. 155-162.
14. Мікосянчик О. О., Литвиненко В. А., Жосан О. Ю., Педан Є. В. Оцінка якості виробів з композиційних матеріалів за характеристиками міцності. *Проблеми тертя та зношування*. 2022. №. 4(97). С. 36-43.
15. Du F., Wang J.A., Tan T. Study on Fracture of Fiber-Reinforced Polymeric Composites Using Spiral Notch Torsion Test. In: Abdel Wahab, M. (eds) *Proceedings of 1st International Conference on Structural Damage Modelling and Assessment. Lecture Notes in Civil Engineering: Springer, Singapore*, 2021. Vol. 110. P. 151-165.
16. Шевченко О.А., Рогожина Н.О. Параметри та релаксація пошкоджень від низькошвидкісного удару вуглепластиків з різними структурами наповнювача. *Матеріали XVI міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2023»*. К.: НАУ, 2023. С.1.70-1.74.
17. Lemanski S.L, Wang J., Sutcliffe M.P.F., Potter K.D., Wisnom M.R. Modelling failure of composite specimens with defects under compression loading. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2013. Vol. 48. P. 26-36.

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

Педан Євген Валерійович – здобувач вищої освіти освітнього ступеня магістр за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка», освітньо-професійна програма «Якість, стандартизація та сертифікація», Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: kedr23edan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8761-750X>.

Мнацаканов Рудольф Георгійович – д. техн. наук, професор, професор кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 76 70, Email: mnatsakanov@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5035-2432>.

Хімко Андрій Миколайович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 72 58, E-mail: andreykhimko@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0009-8059-880X>.

Богдан Світлана Юрївна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 72 73, E-mail: sv.yu.bogdan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9506-6357>.

Чава Катерина Сергіївна – здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 131 Прикладна механіка освітньо-професійна програма «Прикладна механіка, стандартизація та оцінка якості технічних систем», Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, Email: ekaterinaserheevna@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-9181-8008>.

O. O. MIKOSIANCHYK, Y. V. PEDAN, R. G. MNATSAKANOV, A.M. KHIMKO,
S. Y. BOGDAN, K. S. CHAVA

ANALYSIS OF MODELS AND METHODS FOR ASSESSING THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

The expediency of combining complex design systems and conducting standardized mechanical tests in the development of new composite materials in order to increase the reliability of products and structures is substantiated. The analysis of modern software complexes of finite element analysis SolidWorks, ANSYS, Abaqus and Patran/Nastran for modeling the properties of composite materials was carried out. The peculiarities of predicting various forms of destruction of polymer composite materials are determined, estimates of potential mechanisms of destruction, PCM damage models depending on the software complex used in the design of products from composite materials are given. The application of the edge effects model in layered composites, displacement compatibility models, adhesion models, linearized three-dimensional fracture criteria and other fracture models with the rate of energy release, the method of virtual crack closure in calculating the damage resistance of laminated composite structures at the design stages is considered. The main aspects of methods of research and determination of mechanical properties of composite materials under tension and compression according to ISO and ASTM standards are considered. The procedure for creating a regulatory and technical base in the field of production and application of PCM is analyzed from the standpoint of bringing the national standardization system closer to international and European norms and rules.

Keywords: composite materials, test methods, standardization, modeling, failure criteria.

Referenses

1. Woigk W., Hallett S.R., Jones M.I., Kultz M., Hornig A., Gude M. Experimental investigation of the effect of defects in automated fibre placement produced composite laminates. *Composite Structures*. 2018. Vol. 201. P. 1004-1017.
2. Furtado C., Pereira L., Tavares R., Salgado M., Otero F., Catalanotti G., et al. A methodology to generate design allowables of composite laminates using machine learning. *International Journal of Solids and Structures*. 2021. Vol. 233. Article 111095.
3. Li S., Thouless M.D., Waas A.M. et al. Use of a cohesive-zone model to analyze the fracture of a fiber-reinforced polymer-matrix composite. *Composites Science and Technology*. 2005. 65. P.537-549.
4. Grinevich, D.V., Nuzhnyi, G.A., Buznik, V.M. et al. Destruction of Reinforced Ice Composition Materials upon Bending Mechanical Loading. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020. Vol. 11. P. 941-946.
5. Mascia N. T., Simoni R. A. Analysis of failure criteria applied to wood. *Engineering Failure Analysis*. 2013. Vol. 35. P. 703-712.
6. Grinevich D.V., Yakovlev N.O., Slavin A.V., Lashov O.A. Peculiarities of modeling the delamination of polymer composite materials during separation. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*. 2022. 1. P. 2-10.
7. Dzierwa A., Stelmach N. Analysis of strength criteria in the design of products from composite materials. *Visnik KPI. Serija Priladobuduvannja*. 2020. Vip. 59(1). C. 46-50.
8. Kriterij razrusheniya dlja kompozitnyh materialov. URL: [https://help.solidworks.com/\(data_zvernennja: 07.09.2023\)](https://help.solidworks.com/(data_zvernennja: 07.09.2023)).
9. Astanin V., Bogdan S. Finite Element Model of Laminated Shells of Composite Materials. *Strength of materials*. 2021. T. 53, вип. 2. C. 265 – 271.
10. Astanin V., Bogdan S. Strength of the Layered Cylindrical Shell of Composites Under Internal Pressure with Regard to External Damage. *Strength of materials*. 2021. T. 53, вип. 3. C. 423 – 429.
11. Kompozicijni materiali. URL: https://www.tpolis.com/ansys/files/ansys_composite.pdf (data_zvernennja: 07.09.2023).

11. Abaqus Damage criteria. URL: https://caeassistant.com/fracture_damage/ (data zvernennja: 07.09.2023).
12. Reiner J., Vaziri R. Structural Analysis of Composites With Finite Element Codes: An Overview of Commonly Used Computational Methods. *Comprehensive Composite Materials II*. 2018. Vol. 8. P. 61-84.
13. Becker W., Jin P.P., Neuser P. Interlaminar stresses at the free corners of a laminate. *Composite Structures*. 1999. Vol. 45, Is. 2. P. 155-162.
14. Mikosjanchik O. O., Litvinenko V. A., Zhosan O. Ju., Pedan Є. V. Ocinka jakosti virobiv z kompozicijnih materialiv za karakteristikami micnosti. *Problemi tertja ta znoshuvannja*. 2022. №. 4(97). C. 36-43.
15. Du F., Wang J.A., Tan T. Study on Fracture of Fiber-Reinforced Polymeric Composites Using Spiral Notch Torsion Test. In: Abdel Wahab, M. (eds) *Proceedings of 1st International Conference on Structural Damage Modelling and Assessment. Lecture Notes in Civil Engineering: Springer, Singapore, 2021. Vol. 110. P. 151-165.*
16. Shevchenko O.A., Rogozhina N.O. Parametri ta relaksacija poshkodzen' vid niz'koshvidkisnogo udaru vugleplastikov z riznimi strukturami napovnjuvacha. *Materiali HVI mizhnarodnoï naukovo-tehnicnoï konferencii «AVIA-2023»*. K.: NAU, 2023. S.1.70-1.74.
17. Lemanski S.L, Wang J., Sutcliffe M.P.F., Potter K.D., Wisnom M.R. Modelling failure of composite specimens with defects under compression loading. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2013. Vol. 48. P. 26-36.

Mikosiianchyk Oksana Oleksandrivna – 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>.

Pedan Yevhen Valeriyovych – Graduate of Higher Education with a Master`s Degree in Specialty 152 «Metrology and Information-measuring Technology», Educational and Professional Program «Quality, Standardization and Certification», National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: kedr23edan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8761-750X>.

Mnatsakanov Rudolf Georgievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Aircraft Continuing Airworthiness Department, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: mnatsakanov@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5035-2432>.

Khimko Andrii Mykolayovych – Candidate. technical of Sciences, associate professor, associate professor of Aircraft Continuing Airworthiness Department, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: andreykhimko@ukr.net , <https://orcid.org/0009-0009-8059-880X>.

Bogdan Svitlana Yuriyivna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: sv.yu.bogdan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9506-6357>.

Chava Kateryna Serhiivna – Masters student of the Second (Master's) Degree of Higher Education in Specialty 131 "Applied Mechanics", Educational and Professional Program "Applied Mechanics, Standardization and Quality Assessment of Technical Systems", National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: ekaterinaserheevna@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-9181-8008>.