

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра прикладної механіки та інженерії матеріалів

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

д.т.н., професор

Оксана МІКОСЯНЧИК

«21» грудня 2023 р.

Кваліфікаційна робота

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬО-КВАЛІФІКАЦІЙНОГО СТУПЕНЯ
“МАГІСТР”**

Тема: Удосконалення процесу оцінки якості виробів з композиційних матеріалів в авіабудуванні

Виконавець: Євген ПЕДАН

Керівник: д.т.н., професор Оксана МІКОСЯНЧИК

Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:

розд. “Охорона навколишнього середовища” Володимир МЕЛЬНИК

Нормоконтролер: Оксана МІКОСЯНЧИК

КИЇВ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Аерокосмічний факультет

Кафедра прикладної механіки та інженерії матеріалів

Спеціальність 152. «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
Освітньо-професійна програма «Якість, стандартизація та сертифікація»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
д.т.н., професор
_____ Оксана МІКОСЯНЧИК
“05” жовтня 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на виконання кваліфікаційної роботи

_____ Євген ПЕДАН _____

- 1. Тема кваліфікаційної роботи** «Удосконалення процесу оцінки якості виробів з композиційних матеріалів в авіабудуванні» затверджена **наказом ректора № 2035/ст від 05.10.2023 року.**
- 2. Термін виконання роботи:** з 02 жовтня по 31 грудня 2023 року
- 3. Вихідні дані до роботи:**Композитні матеріали, міцнісні характеристики виробів з композиційних матеріалів, методи контролю якості композиційних матеріалів, нормативні документи оцінки якості виробів з композиційних матеріалів.
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. Розділ 1. Стандартизація та властивості композитних матеріалів Розділ 2. Випробовування композитних матеріалів Розділ 3 Методи контролю якості композитних матеріалів. Розділ 4. Особливості екологічної безпеки при впровадженні композиційних матеріалів
- 5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу:**
 1. Вступ, 2. Основні аспекти механічних випробувань КМ при розтягуванні за стандартами ISO та ASTM. 3. Матеріали для конструкцій літака В-787. 4. Схема орієнтації армуючих волокон для забезпечення високої жорсткості виробу. 5. Схема вимірювання ударної в'язкості за допомогою ударних випробувань. 6. Схема руйнування при зсуві: а - незруйнований шар; б - зруйнований шар. 7. Стандарти ISO та ASTM на механічні випробування при стисканні. 8. Огляд методів термічної обробки композитних матеріалів.

6. Календарний план-графік

№ п/п	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Ознайомитися з літературою та сформулювати структуру кваліфікаційної роботи	02.10-12.10 2023	
2.	Написати вступ	13.10-25.10. 2023	
3.	Розробити розділ 1	26.10-12.11 2023	
4.	Розробити розділ 2	13.11-23.11 2023	
5.	Розробити розділ 3	24.11-08.12 2023	
6.	Розробити розділ 4	09.12-15.12 2023	
6.	Сформулювати висновки по роботі.	16.12-19.12 2023	
7.	Оформити кваліфікаційну роботу та здати на рецензію.	20.12-21.12. 2023	

7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона навколишнього середовища	Доцент Володимир МЕЛЬНИК	02.10.2023 Володимир МЕЛЬНИК	18.12.2023 Володимир МЕЛЬНИК

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис керівника)

Оксана МІКОСЯНЧИК
(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис випускника)

Євген ПЕДАН
(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Удосконалення процесу оцінки якості виробів з композиційних матеріалів в авіабудуванні»: сторінок 109, рисунків 34, таблиць 4, використаних джерел 40.

КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ, СТАНДАРТИ, ВИПРОБУВАННЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ, НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ.

Об'єкт дослідження – міцнісні характеристики композиційних матеріалів.

Предмет дослідження – критерії оцінки стандартизованих випробувань при дослідженні міцності, пластичності, жорсткості композиційних матеріалів.

Мета дослідження – удосконалення стандартів на механічні випробування при оцінці якості виробів з композиційних матеріалів для прогнозування міцнісних характеристик композиційних матеріалів.

Методи дослідження – систематизація та аналіз стандартів механічних випробувань композиційних матеріалів, методи оцінки механічних властивостей композиційних матеріалів, неруйнівні методи контролю якості виробів з композиційних матеріалів.

В роботі запропоновано забезпечення якості виробів та конструкцій з композиційних матеріалів на етапі лабораторних та стендових випробувань шляхом комплексного аналізу їх механічних властивостей; розроблені пропозиції по удосконаленню стандартів оцінки міцнісних показників композиційних матеріалів за рахунок введення додаткових методів аналізу властивостей матриці, волокон, навантажувально-швидкісних та температурних чинників з метою розробки рекомендацій щодо використання виробів з композиційних матеріалів в певних експлуатаційних умовах.

Застосоване в роботі дослідження може використовуватись в практичній діяльності для удосконалення системи стандартизації в оцінці фізико-механічних властивостей композиційних матеріалів, направленої на підвищення надійності, стійкості та безпеки композиційних виробів та конструкцій в авіаційній галузі, галузі машинобудування та ін..

РЕФЕРАТ

REFERENCES

Explanatory note to the qualification work "Improvement of the process of quality assessment of products made of composite materials in aircraft construction": pages 109, figures 34, tables 4, references 40.

COMPOSITE MATERIALS, STANDARDS, TESTS, STRENGTH CHARACTERISTICS, NON-DESTRUCTIVE TESTING.

Object of study - strength characteristics of composite materials.

Subject of research - criteria for evaluating standardized tests in the study of strength, plasticity, and stiffness of composite materials.

Purpose of the study - to improve the standards for mechanical testing in assessing the quality of products made of composite materials to predict the strength characteristics of composite materials.

Research methods - systematization and analysis of standards for mechanical testing of composite materials, methods for assessing the mechanical properties of composite materials, non-destructive testing methods for quality control of products made of composite materials.

The work proposes to ensure the quality of products and structures made of composite materials at the stage of laboratory and bench tests by a comprehensive analysis of their mechanical properties; proposals have been developed to improve the standards for assessing the strength properties of composite materials by introducing additional methods for analyzing the properties of the matrix, fibers, load, speed and temperature factors in order to develop recommendations for the use of products made of composite materials in certain operating conditions.

The research applied in this work can be used in practice to improve the standardization system in assessing the physical and mechanical properties of composite materials aimed at improving the reliability, stability and safety of composite products and structures in the aviation industry, mechanical engineering, etc.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	Ошибка! Закладка не определена.
1.1. Забезпечення високого рівня безпеки об'єктів авіаційної галузі та галузі машинобудування стандартизацією оцінки фізико-механічних властивостей композиційних матеріалів.	Ошибка! Закладка не определена.
1.2 Вплив механічних характеристик композиційних матеріалів на експлуатаційні показники якості виробів.	17
1.3. Удосконалення технологій виробництва композиційних матеріалів для розширення галузей їх практичного застосування.	28
Висновки до розділу 1.....	35
РОЗДІЛ 2 ВИПРОБОВУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	36
2.1 Методи оцінки механічних властивостей композиційних матеріалів.	36
2.2 Огляд методів неруйнівного контролю якості композиційних матеріалів.	51
Висновки до розділу 2.....	63
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	64
3.1 Аналіз стандартів оцінки фізико-механічних характеристик композиційних матеріалів.....	64
3.2.Розробка пропозицій щодо вдосконалення існуючих стандартів оцінки міцнісних властивостей КМ.	Ошибка! Закладка не определена.
Висновки до розділу 3.....	64
РОЗДІЛ 4 ОСОБЛИВОСТІ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	
.....	92

4.1 Доцільність перероблюваності композитних матеріалів.	92
4.2. Методи переробки композитних матеріалів.	94
4.3 Економія на вторинній переробці.....	103
Висновки до розділу 4.....	104
ВИСНОВКИ	105
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ	106

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

КМ – композитні матеріали

ЗОР – змащувально-охолоджувальна речовина

ЕС – епоксидні сполуки

АВ – армуючі волокна

ВВ – вуглецеві волокна

НК – неруйнівний контроль

ПС – повітряне судно

ТПВ – технологічна підготовка виробництва

ПКМ – полімерні композиційні матеріали

ТП – технологічні процеси

ВСП – вихрострумові перетворювачі

ТУ – технчні умови

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 полей 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 неминуче виникає 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 волоконном 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, **актуальним напрямком досліджень** є якісний вибір методів механічних випробувань композиційних матеріалів та удосконалення стандартів щодо оцінки їх міцнісних характеристик на основі запровадження методик проведення додаткових випробувань, що дозволить з високою надійністю прогнозувати основні механізми руйнування та міцність композиційних матеріалів.

Кваліфікаційна робота має на меті розглянути багатогранний взаємозв'язок між композитними матеріалами та стандартизацією в авіаційній промисловості. У ній робиться спроба поглиблено дослідити значення стандартизації у забезпеченні безпеки, якості та надійності композитних матеріалів, що використовуються в авіації; проаналізувати процеси і принципи, що лежать в основі стандартизації, останні інновації в

композитних матеріалах і методи оцінки їхніх механічних характеристик. Таким чином, ця робота не тільки робить внесок у знання в галузі авіаційного матеріалознавства та інженерії, а й підкреслює глибоку важливість цих взаємопов'язаних елементів у майбутньому авіації.

Метою роботи є удосконалення стандартів на механічні випробування при оцінці якості виробів з композиційних матеріалів для прогнозування міцнісних характеристик композиційних матеріалів.

Для забезпечення якісної оцінки міцнісних характеристик композиційних матеріалів за їх фізико-механічними властивостями **необхідно вирішити наступні завдання:**

– проаналізувати роль стандартизації в авіаційній промисловості, приділяючи особливу увагу тому, як стандарти впливають на оцінку міцності композитних матеріалів, контроль якості та процедури сертифікації;

– дослідити останні досягнення в процедурах оцінки механічних характеристик композиційних матеріалів, проаналізувати методологію та критерії оцінки даних характеристик;

– проаналізувати і порівняти різні методи і методики оцінки міцності композиційних матеріалів, виділивши їх переваги і недоліки. Ця критична оцінка забезпечить основу для розуміння найбільш ефективних підходів до забезпечення безпеки та надійності композитних матеріалів в авіації.

Об'єкт дослідження – міцнісні характеристики композиційних матеріалів.

Предмет дослідження – критерії оцінки стандартизованих випробувань при дослідженні міцності, пластичності, жорсткості композиційних матеріалів.

Методи, застосовані в кваліфікаційній роботі: систематизація та аналіз стандартів механічних випробувань композиційних матеріалів, методи оцінки механічних властивостей композиційних матеріалів, неруйнівні методи контролю якості виробів з композиційних матеріалів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в: забезпеченні якості

виробів та конструкцій з композиційних матеріалів на етапі лабораторних та стендових випробувань шляхом комплексного аналізу їх механічних властивостей; розроблених пропозиціях по удосконаленню стандартів оцінки міцнісних показників композиційних матеріалів за рахунок введення додаткових методів аналізу властивостей матриці, волокон, навантажувально-швидкісних та температурних чинників з метою розробки рекомендацій щодо використання виробів з композиційних матеріалів в певних експлуатаційних умовах.

Практична цінність отриманих результатів полягає в визначенні визначальних чинників процесу формування якісних ознак виробів з КМ; розробці системи забезпечення якості виробів з КМ за вимогами міжнародних (ІСО, ІКАО) та національних стандартів; забезпеченні поглибленого аналізу міцнісних характеристик виробів з композиційних матеріалів на етапах лабораторних та стендових випробувань для удосконалення системи стандартизації в оцінці фізико-механічних властивостей композиційних матеріалів, направленої на підвищення надійності, стійкості та безпеки композиційних виробів та конструкцій в авіаційній галузі, галузі машинобудування та ін.

Наукові праці:

1. О. О. Мікосянчик, О. Є. Якобчук, Є. В. Педан, Н. М. Березівський Вплив ступеня окислення на протизношувальні властивості авіаційних олив. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. 2 (99). С.4-13.

2. О. О. Мікосянчик, Є. В. Педан, Р. Г. Мнацаканов, А. М. Хімко, С. Ю. Богдан, К. С. Чава Аналіз моделей та методів оцінки міцнісних характеристик полімерних композиційних матеріалів. *Проблеми тертя та зношування (Problems of friction and wear)*, 2023, 3 (100). С.15-29 DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17891](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17891)

РОЗДІЛ 1

СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Авіаційна індустрія вимагає найвищого рівня безпеки, надійності та відповідності стандартам. У цьому розділі досліджено як стандартизація впливає на безпеку та надійність літаків, зокрема на механічні характеристики композитних матеріалів, важливих для авіаційної галузі.

1.1. Забезпечення високого рівня безпеки об'єктів авіаційної галузі та галузі машинобудування стандартизацією оцінки фізико-механічних властивостей композиційних матеріалів.

В авіаційній галузі безпека — це головний пріоритет. Життя пасажирів та економічні інтереси вимагають високих стандартів. Стандартизація грає важливу роль в забезпеченні безпеки авіації. Стандарти охоплюють багато аспектів, які впливають на безпеку, включаючи якість матеріалів, принципи дизайну, процедури та протоколи обслуговування. Для забезпечення безпеки всі компоненти літака повинні відповідати жорстким критеріям безпеки. Це стосується також композитних матеріалів, які повинні відповідати конкретним стандартам, що регулюють якість матеріалів, процеси виробництва та методи випробувань [1].

Якість контролю та забезпечення надійності є невід'ємними складовими стандартизації в авіаційній галузі. Щоб забезпечити надійність літаків, необхідні докладні заходи контролю якості. Стандартизовані процедури для випробування матеріалів, виробництва та обслуговування вирішально важливі для підтримання якісних стандартів. Системи, такі як ISO 9001, надають структуровану систему для управління якістю, забезпечуючи, що продукти та процеси відповідають заздалегідь визначеним стандартам якості. У контексті композитних матеріалів дотримання конкретних стандартів забезпечує не тільки надійність, але й послідовність їх

властивостей. Процедури контролю якості, такі як неруйнівний контроль (NDT), використовуються для оцінки цілісності композитних матеріалів у різних компонентах літаків, від фюзеляжу ділянок крил [2].

Авіаційна промисловість є свідченням людської винахідливості, точної інженерії та непохитної прихильності до безпеки. Вона являє собою сукупність технологічних досягнень, направлених на проектування та виготовлення виробів та конструкцій з високою експлуатаційною надійністю. В основі цього невпинного прагнення до досконалості лежить дослідження передових матеріалів і методик, які можуть підвищити експлуатаційні характеристики літака, знизити експлуатаційні витрати і забезпечити найвищий рівень безпеки. Найважливішим серед цих матеріалів є сімейство композитних матеріалів, яке відкрило нову еру в аерокосмічній інженерії.

Унікальні властивості композитних матеріалів відкрили нову еру в авіабудуванні, дозволивши створювати літаки, які не тільки більш економічні та екологічні, але й безпечніші, довговічніші та економічно ефективніші. У цьому прагненні до досконалості композитні матеріали стали невід'ємною і визначальною частиною авіаційного промислового комплексу.

Найчастіше композити представляють собою двокомпонентні гетерофазні системи, утворені об'ємним поєднанням хімічно різнорідних компонентів з чіткою межею поділу між ними і властивостями, якими не володіють кожен з компонентів окремо.

Кожному компоненту, що входить до складу КМ, відводиться своя роль:

- наповнювач - забезпечує міцність і жорсткісні характеристики КМ, локалізує утворені тріщини і т.д.;

- матриця - передає навантаження між елементами арматури, оберігає її від зовнішніх ушкоджуючих впливів, забезпечує монолітність, фіксує форму і розміри виробів з КМ.

Характерними ознаками КМ є:

- 1) багатоконпонентність, оскільки до складу КМ обов'язково входять

два чи більше різного роду матеріалів, в тому числі матриця (М) та армуючі елементи (АЕ);

2) відсутність хімічної взаємодії між компонентами, тобто між ними є тільки фізичні зв'язки (вандерваальсова взаємодія);

3) відсутня взаєморозчинність між компонентами у складі КМ, оскільки між ними завжди існує границя розділу фаз;

4) компоненти КМ підібрані таким чином, щоб було досягнуто явище синергізму, при якому якісні характеристики КМ перевершують характеристики кожного окремо взятого компонента;

5) матриця КМ утворює суцільне середовище, яке зв'язує всі інші компоненти КМ;

6) на стадії виготовлення виробів з КМ матриця часто буває у рідкому або пластичному стані, що дає можливість надавати виробам необхідної форми;

7) жорсткість матриці, як правило, нижча жорсткості АЕ, таким чином навантаження на вироби з КМ приходиться не на М, а на АЕ;

8) багатофункціональність КМ дозволяє повніше задовольняти функціональні потреби, визнані призначенням КМ.

Значення композитних матеріалів в авіації можна пояснити кількома ключовими факторами:

1) Зменшення ваги. Композиційні матеріали характеризуються високою міцністю і низькою щільністю порівняно з традиційними конструкційними металами. Зменшення ваги має ключовий вплив, що виражається в економії палива, збільшенні вантажопідйомності і підвищенні загальних характеристик літака. Це свідчить про трансформаційний потенціал композитних матеріалів, де менша вага безпосередньо призводить до більшої ефективності.

2) Міцність і жорсткість. Композиційні матеріали пропонують надзвичайне поєднання міцності та жорсткості. Ця характеристика робить їх ефективними для створення стійких авіаційних конструкцій. Ці матеріали не

тільки витримують суворі умови польоту, але й роблять значний внесок у безпеку та структурну цілісність літаків. Вони є будівельними блоками у прагненні авіації до довговічності.

3) Стійкість до корозії. В порівнянні з традиційними металами, КМ характеризуються високою стійкістю до корозії. Ця властивість подовжує термін служби літаків, зменшує витрати на технічне обслуговування і надає незамінну перевагу в суворих умовах, що зустрічаються в авіації. Композитні матеріали залишаються неушкодженими там, де метали можуть руйнуватися.

4) Гнучкість конструкції. Однією з визначальних особливостей композиційних матеріалів є їхній високий ступінь гнучкості конструкції. Інженери можуть формувати і накладати шари цих матеріалів відповідно до конкретних аеродинамічних і структурних вимог, сприяючи інноваціям в авіабудуванні. Адаптивність композитів дозволяє інженерам створювати аеродинамічні та структурно ефективні конструкції, які раніше були недосяжними.

5) Екологічні переваги. Зменшення ваги літака в результаті застосування композитних матеріалів призводить до зменшення споживання палива та викидів парникових газів. У той час, коли екологічна стабільність є першочерговим завданням, екологічність композитних матеріалів набуває першочергового значення. В останні роки з метою підвищення вагової ефективності авіаційної техніки ведуться науково-дослідні роботи по визначенню можливості та доцільності заміни алюмінієвих сплавів, використовуваних для виготовлення фюзеляжу і оперення, на КМ. Така заміна дозволить на 40% зменшити масу конструкції, що забезпечить до 20% зниження витрати пального.

Широка інтеграція композиційних матеріалів в авіації вимагає дотримання суворих стандартів і протоколів. Саме тут тема стандартизації стає ключовою, впливаючи на оцінку міцності композитних матеріалів, контроль якості та процедури сертифікації. Стандартизація також передбачає послідовну оцінку властивостей матеріалів і структурної цілісності протягом

усього життєвого циклу літака.

Дотримання авіаційною промисловістю цих суворих стандартів має першорядне значення для забезпечення безпеки та надійності літаків. Як динамічний і жорстко регульований сектор, авіація покладається на міжнародно визнані стандарти для підтримання узгодженості, якості та відповідності в усіх аспектах проектування, виробництва та експлуатації повітряних суден. Стандартизація в авіації поширюється на різні елементи, включаючи матеріали, процеси, випробування і сертифікацію.

Стандартизація пропонує структуровану основу, в рамках якої всі зацікавлені сторони - інженери, виробники, регуляторні органи та експлуатанти - можуть ефективно спілкуватися та співпрацювати. Авіаційні стандарти охоплюють широкий спектр аспектів, які безпосередньо впливають на безпеку, від матеріалів і дизайну до технічного обслуговування та експлуатації. Забезпечення відповідності всіх компонентів літака суворим критеріям безпеки має важливе значення для зниження ризиків. Для композитних матеріалів стандарти диктують процеси контролю якості, необхідні випробування і властивості матеріалів, необхідні для гарантування їх структурної цілісності і безпеки.

Стандартизовані процедури випробування матеріалів, виробництва та технічного обслуговування уможливають послідовний контроль якості. Системи забезпечення якості, такі як ISO 9001 у виробництві, допомагають виявляти і виправляти невідповідності, гарантуючи, що продукція і процеси відповідають заздалегідь визначеним критеріям якості.

Сертифікація авіаційними регуляторними органами, такими як Федеральна авіаційна адміністрація (FAA) в США або Європейське агентство з авіаційної безпеки (EASA) в Європі, є суворим процесом, який вимагає дотримання певних стандартів. Композитні матеріали, їх випробування та застосування повинні пройти комплексні процедури сертифікації, щоб отримати дозвіл на використання в авіабудуванні.

Авіація функціонує в рамках складної системи правил і вимог.

Стандартизація допомагає як виробникам, так і операторам дотримуватися цих правил, гарантуючи, що всі аспекти проектування, виробництва та експлуатації літака відповідають необхідним критеріям льотної придатності та безпеки. Інтеграція композитних матеріалів і впровадження протоколів стандартизації - це динамічна конвергенція, яка пропонує великі перспективи в авіаційній промисловості.

Оскільки аерокосмічна галузь являється передовою галуззю в створенні композиційних матеріалів високої якості, вона потребує високоточних процедур оцінки механічних та фізичних властивостей КМ, розробки критеріїв, на основі яких можливо прогнозувати зміну показників якості виробів з КМ в процесі експлуатації. Створення уніфікованої системи стандартизації оцінки якості КМ надасть можливість впроваджувати в експлуатацію КМ з надійними показниками міцності, жорсткості, вогнестійкості, корозійної стійкості, що забезпечить підвищення ресурсу виробів та конструкцій з КМ.

1.2. Вплив механічних характеристик композиційних матеріалів на експлуатаційні показники якості виробів.

До основних механічних характеристик КМ можна віднести межу міцності на розрив, модуль пружності при вигині, ударну в'язкість. Значення цих властивостей у різних сферах застосування полягає в тому, що вони дозволяють адаптувати композитні матеріали до конкретних потреб. Аерокосмічні інженери виготовляють легкі конструкції з КМ з високою міцністю на розрив для паливно-ефективних літаків. З іншого боку, автомобільні інженери шукають баланс між міцністю на розрив і ударостійкістю для безпеки пасажирів. Розуміння цих властивостей допомагає у виборі матеріалів, проектуванні конструкцій та оптимізації композитів для використання за призначенням. Розглянемо ці характеристики більш детально.

Межа міцності на розрив - це максимальне напруження, яке матеріал

може витримати при розтягуванні, коли поперечний переріз зразка починає значно скорочуватися. Для композитних матеріалів межа міцності на розрив є критично важливою властивістю, оскільки вона визначає, наскільки добре матеріал може витримувати сили, прикладені в напрямку прикладеного навантаження. Ця властивість особливо важлива в таких галузях, як аерокосмічна, де композити використовуються в компонентах літаків, а також в автомобільній і будівельній промисловості [3].

Межа міцності на розрив у композитних матеріалах зазвичай визначається за допомогою стандартизованих методів випробувань, серед яких найчастіше використовуються стандарти ASTM D3039 та ISO 527 (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Основні аспекти механічних випробувань КМ при розтягуванні за стандартами ISO та ASTM

Стандарт	Тип матеріалу для випробувань	Методика випробувань	Результати тестування
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	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.

	попередньо просочених матеріалів (препрегів); термотропні рідкокристалічні полімери.		
--	--	--	--

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 розтягуванні, модуль пружності, відносне подовження, коефіцієнт Пуассона.
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)	ПКМ, армовані вуглецевими, борними, органічними та іншими високоміцними волокнами.	Метод випробування полягає у розтягуванні зразка ПКМ з постійною швидкістю навантаження або деформування до моменту розриву. Випробування проводять в умовах нормальної, низької та підвищеної температури.	Модуль пружності, міцність при розтягуванні , подовження при руйнуванні, коефіцієнт Пуассона, деформацію переходу (для білінійної діаграми).

Ці методи передбачають піддавання композитного зразка одновісному навантаженню на розтяг до руйнування. Для розрахунку міцності на розрив використовується максимальне навантаження до руйнування і площа поперечного перерізу зразка. Такі фактори, як швидкість деформації, геометрія зразка і умови навколишнього середовища можуть впливати на результати випробування [4,5].

Проаналізуємо основні фактори, що можуть впливати на міцність на розрив композиційних матеріалів:

- орієнтація волокон: поздовжні волокна забезпечують найвищу міцність на розрив, тоді як поперечні волокна мають найнижчу міцність;
- матеріал матриці: тип матеріалу матриці, що використовується в композитах, будь то полімер, метал або кераміка, відіграє вирішальну роль у визначенні міцності на розрив. Міцна матриця підвищує загальну міцність на розрив;
- об'ємна частка армуючих волокон у композиті впливає на міцність на розрив. Збільшення об'ємної частки волокон, як правило, призводить до підвищення міцності на розрив.

– міжфазний зв'язок: якість зв'язку між волокнами і матрицею впливає на міцність на розрив. Ефективне з'єднання забезпечує передачу навантаження між компонентами [6].

Проаналізуємо значення межі міцності на розрив у різних сферах застосування КМ. Межа міцності на розрив є критично важливим параметром у широкому спектрі застосувань у різних галузях промисловості. Наведемо кілька важливих прикладів:

1) аерокосмічна промисловість: композитні матеріали з високою міцністю на розрив використовуються для виготовлення компонентів літаків. Ці матеріали мають сприятливе співвідношення міцності до ваги, що сприяє підвищенню паливної ефективності та загальним експлуатаційним характеристикам. Наприклад, композити, армовані вуглецевим волокном, широко застосовуються в конструкціях літаків [7] (рис. 1.1).

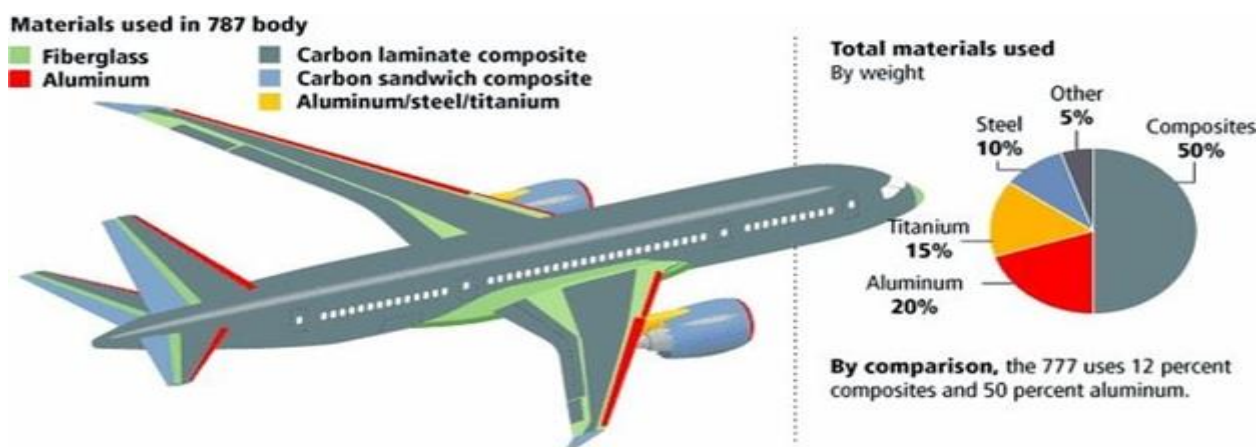
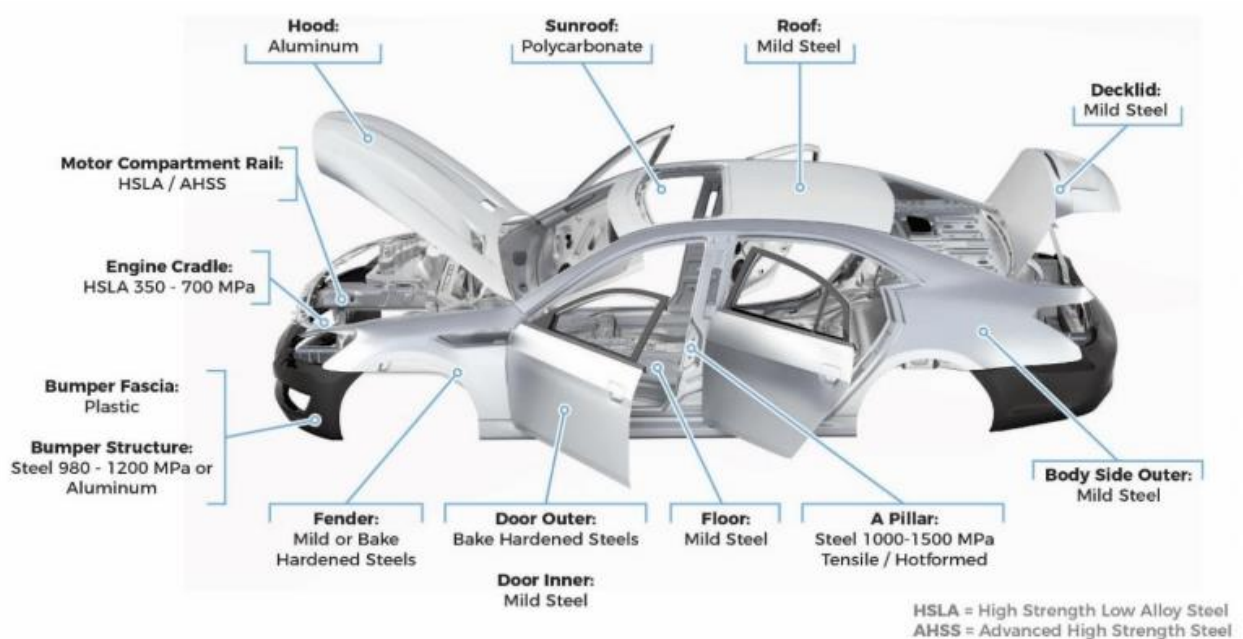


Рис. 1.1. Матеріали для конструкцій літака В-787.

Основні класи композитів, призначені для застосування в літаках, - вуглепластики і склопластики, які широко використовуються при виготовленні і оформленні інтер'єру салону, панелей перегородок багажних і пасажирських відсіків, підлоги, радіопрозорих обтічників. В літаку B-787 обсяг застосування КМ становить до 50%. Кожний такий літак містить 35т вуглепластика, у тому числі 23т вуглеволокон. Важливим позитивним ефектом є відсутність корозії в вуглепластикових конструкціях, що дозволяє експлуатувати літак в умовах великої вологості повітря.

2) автомобільна промисловість: в автомобільному секторі міцність на розрив має вирішальне значення для таких компонентів, як кузовні панелі та шасі (рис. 1.2). Високоміцні композити, в тому числі армовані вуглецевим волокном пластмаси, використовуються для зменшення ваги автомобіля при збереженні структурної цілісності, підвищення паливної ефективності та



безпеки.

Рис. 1.2. Композиційні конструкції автомобіля.

2) будівництво та цивільна інженерія: композиційні матеріали з достатньою міцністю на розрив використовуються в будівельній галузі для будівництва мостів, арматурних конструкцій та сейсмостійких будівельних

матеріалів. Армовані скловолокном композити відомі своєю міцністю на розрив і корозійною стійкістю.

Модуль пружності композиційних матеріалів є одним з визначальних параметрів при оцінці їх механічних властивостей. Модуль пружності при згині (модуль пружності на вигин або просто жорсткість на вигин) характеризує здатність матеріалу чинити опір деформації під дією згинального навантаження. Це найважливіша механічна властивість композитних матеріалів, яка відіграє значну роль у визначенні їхньої придатності для різних застосувань. Проаналізуємо методи вимірювання даного параметру та розглянемо фактори, що впливають на його зміну.

Модуль пружності при згині зазвичай визначається за допомогою стандартизованих методів випробувань, таких як ASTM D790 та ISO 178. Ці методи передбачають прикладання навантаження перпендикулярно до довгої осі зразка, щоб обумовити вигин. Отриманий прогин і прикладена сила використовуються для розрахунку модуля пружності при згинанні. На результати можуть впливати такі фактори, як розміри зразка, проліт опори та умови навантаження [8,9].

Основні фактори, що можуть впливати на модуль пружності при згині композитних матеріалів:

1) орієнтація волокон: орієнтація армуючих волокон у композиті має значний вплив на модуль пружності при згинанні. Волокна, вирівняні за напрямком згинального навантаження, вносять більший внесок у жорсткість (рис. 1.3).

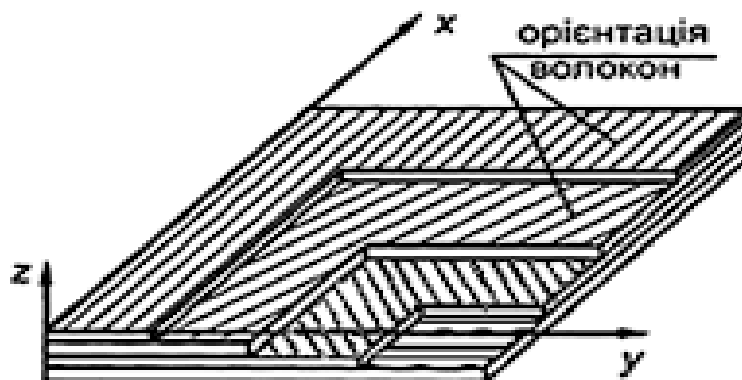


Рис. 1.3. Схема орієнтації армуючих волокон для забезпечення високої

жорсткості виробу.

2) об'ємна частка волокон: чим більша об'ємна частка волокон, тим вищий модуль пружності на вигин.

3) матеріал матриці: тип матеріалу матриці, будь то полімер, метал або кераміка, впливає на модуль пружності при вигині композиту – міцна матриця підвищує жорсткість.

4) міжфазний зв'язок: якість зв'язку між волокнами і матрицею впливає на модуль пружності при згинанні. Ефективне з'єднання забезпечує ефективну передачу навантаження.

Оцінка модуля пружності при згині виробів з композиційних матеріалів знаходить застосування в різних галузях промисловості. Наведемо кілька важливих прикладів:

- виробництво та машинобудування: у виробництві композитні матеріали з високим модулем пружності при згині використовуються в конструкціях, які вимагають жорсткості та стабільності розмірів. До них відносяться компоненти машин, кронштейни та рами.

- спортивні товари: спортивні товари, такі як тенісні ракетки, ключки для гольфу та велосипедні рами, виготовлені з композиційних матеріалів з високим модулем пружності, характеризуються високою надійністю. Ці матеріали забезпечують кращі експлуатаційні характеристики завдяки своїй жорсткості, що дозволяє подовжити ресурс виробів.

- будівництво: композиційні матеріали з високим модулем пружності на вигин використовуються для таких елементів конструкцій, як балки, колони та панелі. Вони мають такі переваги, як зменшена вага, підвищена довговічність і стійкість до корозії.

Ударна в'язкість, яку часто визначають за допомогою ударних випробувань, оцінює здатність матеріалу поглинати енергію при раптовому ударі або навантаженні (рис. 1.4). Це важлива механічна властивість композитних матеріалів, оскільки вона показує, наскільки добре матеріал може розсіювати енергію від ударів без руйнування. Проаналізуємо методи

оцінки даного параметру та фактори, що впливають на нього.

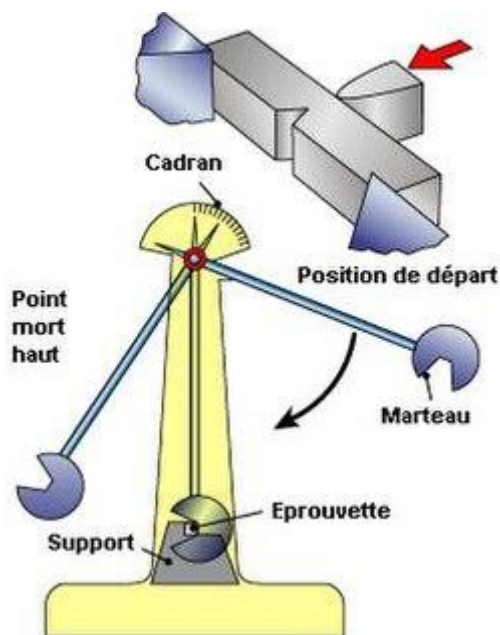


Рис. 1.4. Схема вимірювання ударної в'язкості за допомогою ударних випробувань.

Ударну в'язкість зазвичай оцінюють за допомогою різних методів ударних випробувань, включаючи випробування за Шарпі та Ізодом, а також динамічні ударні випробування, такі як випробування з падінням вантажу. Ці методи передбачають удари маятником або молотком по зразку з надрізами, а енергія, поглинута зразком, використовується для розрахунку ударної в'язкості. Умови випробування, такі як температура, геометрія надрізів і розмір зразка, можуть впливати на результати. ASTM D3763 - Стандартний метод випробування властивостей високошвидкісного проколу пластмас з використанням датчиків навантаження і переміщення.

На ударну в'язкість композитних матеріалів можуть впливати кілька факторів:

- армування волокнами: тип, орієнтація та об'ємна частка армуючих волокон суттєво впливають на ударну в'язкість, орієнтовані в певному напрямку та високоміцні волокна можуть підвищити ударостійкість;

- матеріал матриці: твердість матеріалу матриці відіграє важливу роль в ударній в'язкості. Міцна матриця, наприклад, епоксидна смола, може

ефективно поглинати і розсіювати енергію удару;

– зв'язок між волокном і матрицею: міцний міжфазний зв'язок допомагає передавати навантаження та поглинати енергію;

– температура: ударна в'язкість композитів може змінюватися залежно від температури. Деякі композити демонструють знижену ударну в'язкість при низьких температурах, що має вирішальне значення для застосування в екстремальних умовах.

Ударна в'язкість відіграє важливу роль у різних галузях промисловості:

1) В автомобільній промисловості композитні матеріали з високою ударною в'язкістю застосовуються для виготовлення бамперів, аварійних конструкцій і компонентів інтер'єру. Ці матеріали допомагають поглинати енергію під час зіткнень, підвищуючи безпеку пасажирів.

2) Спортивне обладнання та спорядження, таке як велосипедні шоломи, бейсбольні біти та захисне спорядження, виграють від використання композитних матеріалів з високою ударною в'язкістю. Ці матеріали підвищують безпеку, ефективно розсіюючи енергію удару.

Міцність на зсув є ключовою механічною характеристикою, що визначає стійкість матеріалу до руйнування при зсувних навантаженнях.

Міцність на зсув визначається за допомогою різних методів, таких як:

– тест на зсув передбачає навантаження на зразок в перпендикулярному напрямку до шару композиту, визначаючи його міцність на зсув [10];

– тест на витяг. Деякі методи включають витягування зразків при наявності зсувних навантажень для визначення міцності на зсув [11].

Дія дотичних напружень в площині шару обумовлює такі види руйнування шару (рис. 1.5):

- зсувне руйнування матриці;
- розшарування;
- зсувне руйнування матриці і розшарування.

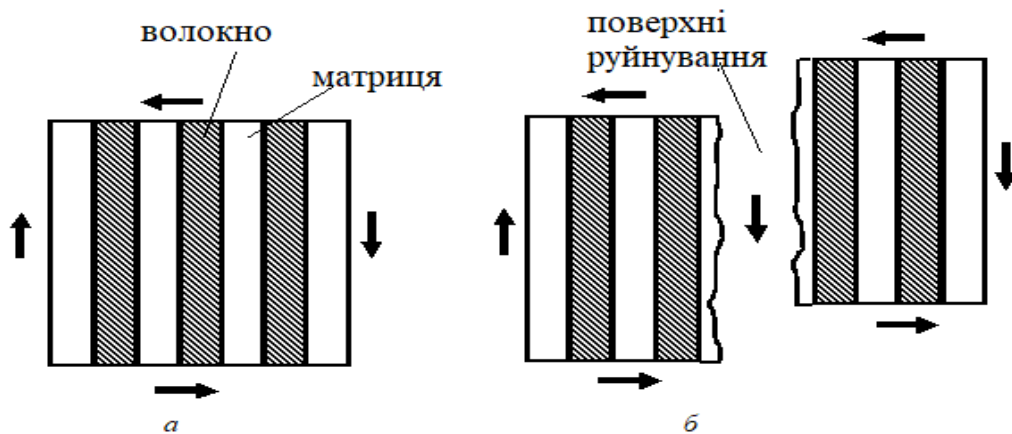


Рис. 1.5 Схема руйнування при зсуві: а - незруйнований шар; б - зруйнований шар

Проаналізуємо ключові фактори, що впливають на міцність на зсув композиційних матеріалів:

1) Вид армування: тип волоконного або часткового армування впливає на міцність на зсув. Наприклад, використання волокон з високою міцністю може покращити цю властивість.[12]

2) Матричний матеріал: матеріал, який оточує армуючі волокна, також впливає на міцність на зсув. Міцні матричні матеріали сприяють підвищенню цієї характеристики [13].

Міцність на зсув відіграє важливу роль у різних галузях:

- у літакобудуванні міцність на зсув важлива для забезпечення стійкості та надійності структурних елементів;

- автомобільна промисловість: композиційні матеріали з високою міцністю на зсув застосовуються у виготовленні деталей кузова та інших елементів автомобілів;

- у будівництві важливою є міцність на зсув для конструкційних матеріалів, що використовуються у стінах, балках та інших структурних елементах.

Межа міцності на стиск: Міцність на стиск оцінює здатність матеріалу витримувати навантаження, прикладені перпендикулярно до його поверхні. Це дуже важливо в тих випадках, коли композитні матеріали зазнають

стискаючих навантажень.

Основні методи випробувань полімерів та ПКМ при розтягуванні та стисканні наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Стандарти ISO та ASTM на механічні випробування при стисканні

Стандарт	Тип матеріалу для випробувань	Методика випробувань	Результати тестування
ISO 14126:1999 "Fibre-reinforced plastic composites – Determination of compressive properties in the in-plane direction" (Армовані волокном пластикові композити – Визначення властивостей при плоскому стисканні).	Армовані волокнами термопластичні і термореактивні пластикові 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 волокном, необхідно випробовувати тестові 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

1.3. Удосконалення технологій виробництва композиційних матеріалів для розширення галузей їх практичного застосування.

Композитні матеріали знайшли широке застосування в різних галузях промисловості завдяки своїм ефективним механічним властивостям та універсальності (рис. 1.6).

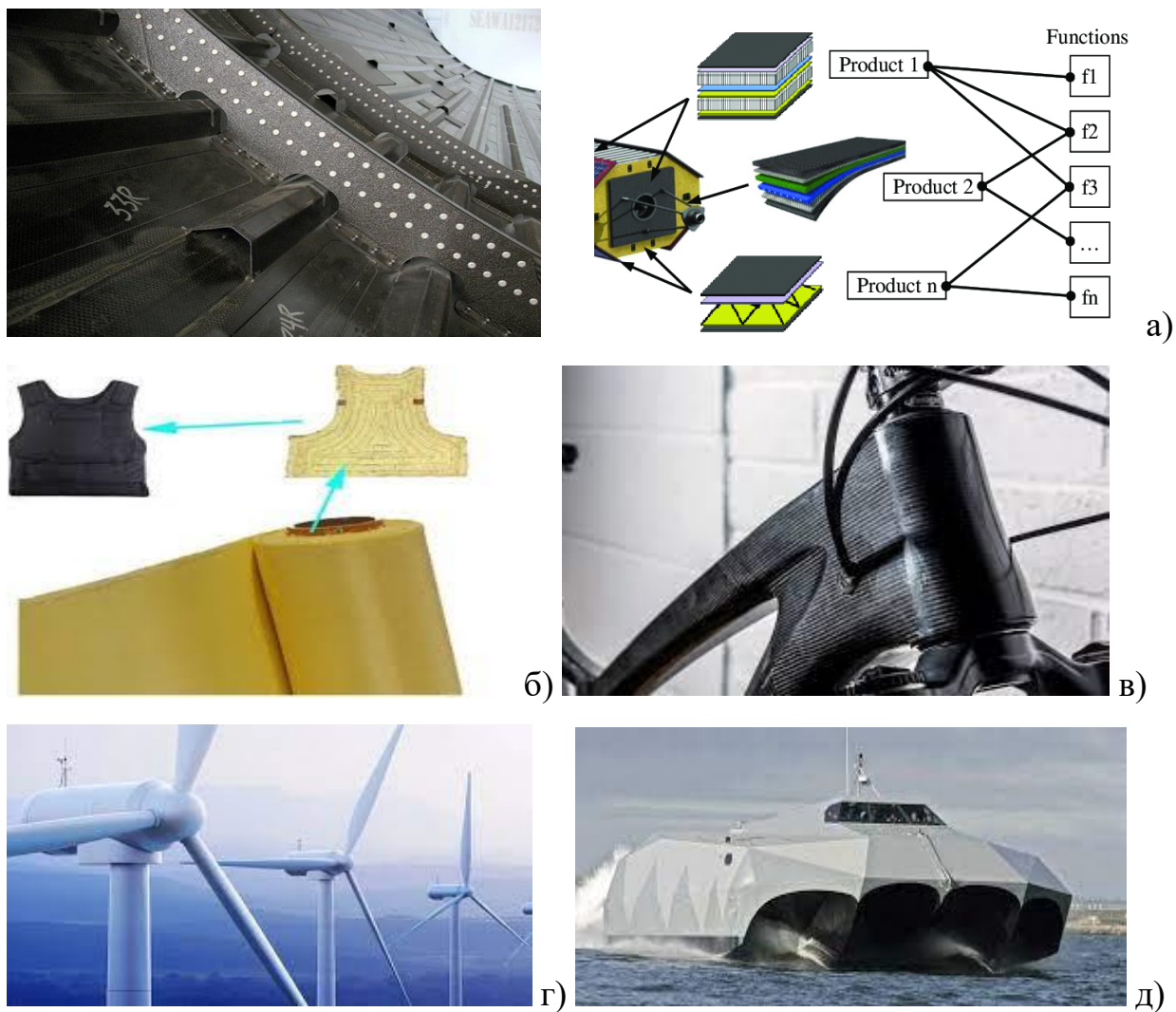


Рис. 1.6. Сфери застосування композиційних матеріалів: а) – аерокосмічна, б) – оборонна та військова промисловість; в) – спортивне оснащення; г) – лопаті вітрових турбін; д) – морська промисловість.

Аерокосмічна галузь є однією з перших, хто почав використовувати композитні матеріали. Тут композити відіграють значну роль у зменшенні ваги літаків, підвищенні паливної ефективності та покращенні експлуатаційних характеристик конструкцій. Практичні застосування в

аерокосмічній галузі включають:

- конструкції літальних апаратів: композити, особливо армовані вуглецевим волокном, широко використовуються в будівництві конструкцій літаків, зокрема крил, фюзеляжів і компонентів планера;

- супутникові компоненти: композиційні матеріали використовуються в супутникових конструкціях і компонентах, де легкість і висока міцність мають важливе значення для запуску і підтримки супутників на орбіті;

- авіаційні двигуни: композитні компоненти в авіаційних двигунах сприяють зменшенню ваги, підвищенню паливної ефективності та зменшенню викидів.

В автомобільному секторі композити набули популярності завдяки своїй здатності зменшувати вагу транспортних засобів, зберігаючи при цьому безпеку та структурну цілісність. Основні сфери застосування включають:

- панелі кузова: композиційні матеріали використовуються у виробництві кузовних панелей, зменшуючи загальну вагу транспортного засобу та покращуючи паливну економічність;

- компоненти шасі: композитні компоненти шасі забезпечують високу міцність і жорсткість при мінімальній вазі, покращуючи керованість і продуктивність.

- інтер'єр та сидіння: композиційні матеріали використовуються в компонентах інтер'єру та системах сидінь, пропонуючи покращений комфорт та зменшену вагу.

Композиційні матеріали застосовуються в цивільному будівництві для різних цілей, насамперед для підвищення довговічності і поліпшення експлуатаційних характеристик конструкцій. Практичні застосування включають:

- будівництво мостів: композити використовуються для компонентів мостів, таких як настили, арматура і кабелі, пропонуючи корозійну стійкість і подовжений термін служби;

- арматурні конструкції: композити застосовуються для зміцнення

існуючих конструкцій, підвищуючи їхню несучу здатність і структурну цілісність;

– сейсмічна модернізація: у сейсмонебезпечних регіонах композити використовуються для модернізації будівель, підвищуючи їхню стійкість до сейсмічної активності.

Оборонна та військова промисловість покладається на композитні матеріали завдяки їх легким, високоміцним та ударостійким властивостям. Сфери застосування включають:

– бронезилети: військовослужбовці оснащені бронезилетами на основі композитів для захисту від балістичних загроз;

– броня транспортних засобів: броньовані транспортні засоби використовують композитні матеріали, щоб протистояти атакам і захищати пасажирів;

– балістичні панелі: будівлі та військові споруди використовують балістичні панелі на основі композитних матеріалів для захисту від снарядів і вибухів.

Композитні матеріали знаходять своє застосування в споживчих товарах та електроніці, де перевага надається легким і міцним матеріалам.

Приклади включають:

– побутова електроніка: композитні матеріали використовуються в корпусах і структурних компонентах смартфонів, ноутбуків та інших електронних пристроїв;

– високопродуктивне спортивне обладнання: висококласні велосипеди, вудки та інше спортивне обладнання використовують композити для підвищення продуктивності;

– музичні інструменти: деякі музичні інструменти, такі як скрипки та піаніно, включають композитні матеріали для досягнення кращої акустики та довговічності.

Технології відновлюваної енергетики виграють від використання композитних матеріалів завдяки їхній легкості та корозійній стійкості.

Застосування включають в себе:

- лопаті вітрових турбін часто виготовляють з композитних матеріалів, щоб максимізувати виробництво енергії і витримати суворі умови навколишнього середовища;

- сонячні панелі: рами та опори сонячних панелей можуть використовувати композитні матеріали для забезпечення структурної цілісності та довговічності.

У морській промисловості композити використовуються завдяки їхній стійкості до корозії та високому співвідношенню міцності до ваги.

Застосування включає в себе:

- корпуси човнів: композити використовуються в будівництві корпусів човнів, забезпечуючи легке і міцне рішення для різних типів суден;

- підводні апарати: підводні апарати та дистанційно керовані апарати (ROV) використовують композити для забезпечення плавучості та структурної цілісності в підводному середовищі.

Композиційні матеріали зазнали значного зростання і застосування в різних галузях промисловості, тому доцільно розглянути як проблеми, так і нещодавні досягнення в технології виготовлення виробів та конструкцій з композиційних матеріалів.

Технологія композитних матеріалів стикається з кількома проблемами:

- вартість: високоефективні композитні матеріали можуть бути дорогими у виробництві, що обмежує їх широке застосування в деяких галузях промисловості;

- переробка та утилізація: переробка та утилізація композитних матеріалів може бути складною через різні матеріали, що використовуються в композитах, та методи їхнього з'єднання;

- довговічність: композити можуть бути вразливими до факторів навколишнього середовища, таких як волога, ультрафіолетове випромінювання та екстремальні температури, що може вплинути на їхню довготривалу довговічність;

– масштабування виробництва: масштабування виробництва композитних матеріалів для задоволення потреб великих галузей промисловості, таких як автомобілебудування та будівництво, може бути складним завданням;

– стандартизація: створення стандартизованих методів тестування та процесів контролю якості має вирішальне значення для забезпечення надійності та безпеки композитних матеріалів.

У відповідь на ці виклики в галузі технології композитних матеріалів було досягнуто певних успіхів. До передових технологій виробництва необхідно віднести інновації у виробничих процесах, такі як автоматизоване розміщення волокон і 3D-друк, уможливили більш ефективно і економічно вигідне виробництво композитних компонентів (рис. 1.7).

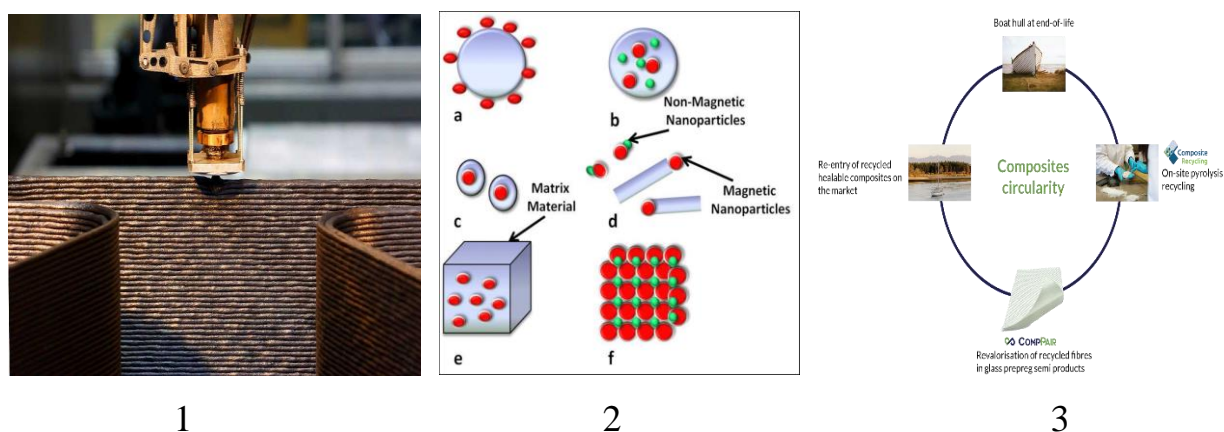


Рис. 1.7. Новітні технології виробництва композитів: 1 – 3D-друк; 2 – наноструктуровані композити; 3 – технології повторного використання.

Наноструктуровані композити набувають поширення в різних галузях застосування, зокрема, як зносостійкі та антифрикційні матеріали. Включення наноматеріалів, таких як вуглецеві нанотрубки та графен, призвело до розробки нанокомпозитів з покращеними механічними властивостями, теплопровідністю та електропровідністю (рис. 1.7).

Дослідження методів переробки композитів тривають, і такі процеси, як піроліз і хімічна переробка, є перспективними для повторного використання композитних матеріалів.

Розробка композитів з використанням біологічних полімерів і натуральних волокон сприяє сталому розвитку та зменшенню впливу на навколишнє середовище.

Перспективними КМ є гібридні композити. Поєднання різних типів волокон і матриць для створення гібридних композитів дозволяє пристосовувати матеріали до конкретних вимог, наприклад, підвищеної ударостійкості або зменшеної ваги.

Актуальним напрямком створення КМ з новими властивостями є напрям «розумні композити»: інтеграція датчиків і приводів у композити дозволяє розробляти "розумні" матеріали, які можуть відчувати і реагувати на зовнішні подразники, що знаходить застосування в аерокосмічній галузі, інфраструктурі та охороні здоров'я.

Передові інструменти моделювання та імітації допомагають у розробці та оптимізації композитних конструкцій, зменшуючи потребу в дорогих фізичних прототипах. 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 прикладенім до неї навантаженням і граничним умовам отримати розподіл полів напружень і деформацій. З урахуванням отриманих результатів роблять висновки про виконання умови міцності. Найбільш простий розрахунковий випадок - однорідний матеріал. Однак в даний час велика кількість деталей створюють з полімерних композиційних матеріалів, які складаються з різнорідних компонентів, що володіють індивідуальними властивостями і особливостями - матриця служить сполучною основою, а армуючі наповнювачі мають високу міцність.

В автомобільній промисловості легкі композити, в тому числі армовані вуглецевим волокном пластмаси, використовуються для підвищення паливної ефективності та зменшення викидів.

Важливе значення приділяється технологіям ремонту композитних

виробів та конструкцій. Досягнення в технології ремонту композитів подовжують термін служби композитних конструкцій в аерокосмічній, автомобільній та цивільній галузях.

Майбутнє технології композитних матеріалів пов'язане з кількома багатообіцяючими тенденціями:

- сталі композитні матеріали: зростаюча увага до екологічно чистих матеріалів стимулюватиме розвиток композитів з відновлюваних ресурсів та інтеграцію процесів переробки відходів;

- передові нанокompозити: подальший прогрес в інтеграції наноматеріалів призведе до створення нанокompозитів з чудовими властивостями та багатофункціональними можливостями;

- галузеві рішення: композитні матеріали будуть все більше пристосовуватися до конкретних потреб таких галузей, як аерокосмічна, автомобільна та відновлювана енергетика;

- розробка стандартів: встановлення глобальних стандартів для тестування, контролю якості та оцінки впливу на навколишнє середовище підвищить надійність і безпеку композитних матеріалів.

Висновки до розділу 1.

1. Проаналізовано основні механічні властивості композиційних матеріалів, такі як міцність на розрив, модуль пружності при згинанні та міцність на зсув. Ці властивості є фундаментальними у визначенні експлуатаційних характеристик матеріалів у різних галузях, таких як аерокосмічна, автомобільна, будівельна, виробництво, спорт та інші. Розуміння факторів, що впливають на ці властивості, має вирішальне значення для ефективного проектування, вибору та застосування композитних матеріалів. Дослідження цих механічних аспектів сприятиме покращенню надійності та ефективності систем у відповідних галузях, що робить це вивчення важливим у контексті подальшого розвитку і використання сучасних матеріалів.

2. Удосконалення процесів стандартизації в оцінці міцності композитних матеріалів та забезпечення якості сприятиме проектуванню та будівництву безпечних, ефективних та екологічно відповідальних повітряних суден.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИПРОБОВУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ЇХ ЯКОСТІ

На міцність і вид руйнування ПКМ впливають багато чинників, таких як:

- об'ємні частки волокон і матриці;
- розмір і число пор;
- розподіл волокон;
- пружні та міцнісні властивості волокон і матриці;
- міцність адгезійної взаємодії на межі волокно- матриця;
- напружений стан в шарі, обумовлений прикладеним навантаженням;
- технологічні параметри процесу отримання шару.

При високій адгезійній міцності між матрицею і волокнами і низькому вмісті волокон спостерігається крихке руйнування. Шари із середнім об'ємним наповненням волокном (40...60%) руйнуються крихко з витягуванням волокон. При високій об'ємній частці волокон (більше 65%) шари руйнуються з порушенням зв'язку між волокнами і матрицею з витягуванням волокон, розшарування. Провести чіткі межі між видами руйнування неможливо через вплив перерахованих вище факторів на міцність і вид руйнування.

2.1 Методи оцінки механічних властивостей композиційних матеріалів.

Процедура випробування на розтяг. Підготовка зразка: Композитні зразки ретельно готують зі стандартизованими розмірами, забезпечуючи однорідність і відтворюваність. Вибір геометрії зразка, наприклад, собача кістка або плоскі зразки, часто визначається стандартами випробувань (рис. 2.1).

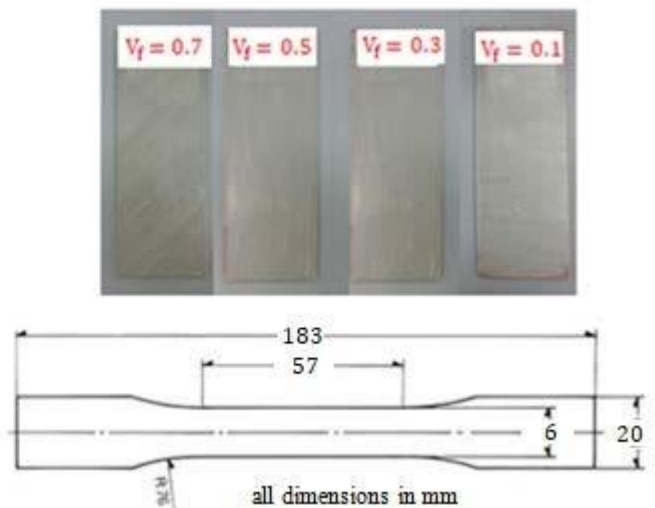


Рис. 2.1. Стенд для випробувань КМ на розтяг та зразки для випробувань.

Процедура випробувань КМ на розтяг включає наступні етапи:

- монтаж зразків: підготовлений зразок надійно закріплюється в машині для випробування на розтягнення за допомогою захватів або затискачів. Захвати повинні утримувати зразок без зісковзування під час випробування;
- прикладання навантаження: машина прикладає навантаження на розтягнення до зразка з постійною або заданою швидкістю. Навантаження поступово збільшується, і машина реєструє результуючу силу і деформацію;
- реєстрація, аналіз та обробка даних: під час випробування безперервно збираються дані про навантаження і переміщення. Ці дані дозволяють побудувати криву "напруження-деформація", яка ілюструє, як матеріал реагує на прикладене навантаження.

Визначення основних механічних характеристик КМ при розтягуванні: на основі кривої "напруження-деформація":

- межа міцності на розрив: максимальне напруження, яке матеріал може витримати до руйнування;
- модуль Юнга (E): міра жорсткості матеріалу в пружній області;
- межа текучості: напруга, при якій матеріал проявляє пластичну

деформацію;

– подовження при розриві: на скільки розтягується матеріал перед розривом.

– модуль пружності: енергія, що поглинається матеріалом під час пружної деформації.

– – модуль жорсткості: загальна енергія, поглинута матеріалом під час деформації до руйнування.

Випробування на розтяг має важливе значення з кількох причин:

1) Характеристика матеріалу: надає вичерпну інформацію про поведінку матеріалу при розтягуванні, включаючи його міцність, жорсткість, пластичність і в'язкість.

2) Контроль якості: випробування на розтяг є стандартним методом контролю якості у виробничих процесах, гарантуючи, що композитні матеріали відповідають проектним специфікаціям.

3) Вибір матеріалу: інженери та дизайнери використовують дані випробувань на розтягнення, щоб вибрати найбільш підходящий композитний матеріал для конкретного застосування, збалансувавши міцність і вагу.

4) Дослідження і розробки: випробування на розтяг допомагають у розробці нових композитних матеріалів і виробничих процесів, оцінюючи їхні механічні характеристики.

5) Аналіз відмов: коли композитні матеріали виходять з ладу в реальних умовах застосування, випробування на розтягнення може допомогти визначити першопричини і внести поліпшення.

5) Стандартизація: методи і стандарти випробувань на розтягнення, такі як ASTM D3039 і ISO 527, забезпечують загальну основу для порівняння матеріалів і обміну даними.

Випробування на розтягнення композитних матеріалів проводяться відповідно до встановлених стандартів для забезпечення узгодженості та надійності. До основних стандартів відносяться:

– ASTM D3039: цей стандарт, опублікований ASTM International, містить настанови щодо проведення випробувань на розтягнення композитних матеріалів з полімерною матрицею;

– ISO 527: цей міжнародний стандарт визначає методи визначення властивостей пластмас при розтягуванні, що часто застосовується до композитних матеріалів з полімерною матрицею.

Випробування на вигин, також відоме як випробування на три- або чотириточковий вигин, є широко використовуваним методом оцінки властивостей композиційних матеріалів на вигин. Цей метод необхідний для визначення таких параметрів, як модуль пружності при згині, міцність на вигин та інших пов'язаних з ними властивостей (рис. 2.2).

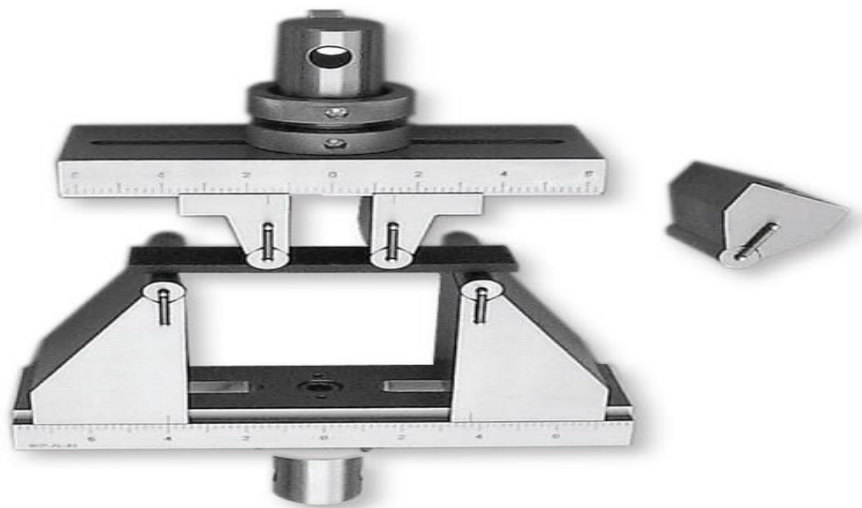


Рис. 2.2. Метод механічних випробувань композиційних матеріалів при вигині.

Процедура випробування на вигин включає наступні етапи:

– підготовка зразків: композитні зразки готуються з певними розмірами, зазвичай у вигляді прямокутних брусків або балок, що забезпечує стандартизовану геометрію для проведення випробувань;

– монтаж зразків: підготовлений зразок встановлюється в машину для випробування на вигин, яка прикладає навантаження перпендикулярно до довгої осі зразка. У разі триточкового вигину навантаження прикладається в двох точках по довжині зразка, в той час як при чотириточковому вигині

додаткові точки опори допомагають контролювати деформацію вигину;

- прикладання навантаження: установка оснащена механізмами прикладання навантаження з постійною або заданою швидкістю, викликаючи згинання зразка. Реєструється як прикладена сила, так і результуюче переміщення;

- реєстрація даних: під час випробування безперервно збираються дані про навантаження і переміщення. Ці дані використовуються для побудови кривої залежності навантаження від прогину.

На основі кривої "навантаження - прогин" визначаються ключові властивості при згинанні, в тому числі:

- модуль пружності при вигині: міра жорсткості матеріалу при вигині;
- міцність на вигин: максимальне навантаження, яке матеріал може витримати до руйнування при згинанні;

- модуль пружності: енергія, що поглинається матеріалом під час пружної деформації;

- модуль жорсткості: загальна енергія, поглинута матеріалом під час згинання до руйнування.

Випробування на вигин важливе з різних причин:

- 1) Структурний дизайн: воно надає інженерам і дизайнерам необхідні дані для оцінки придатності матеріалу для застосування в конструкціях, де переважають згинальні навантаження, таких як балки, панелі і структурні компоненти.

- 2) Контроль якості: випробування на вигин використовується для контролю якості у виробничих процесах, гарантуючи, що композитні матеріали відповідають проектним специфікаціям щодо міцності та жорсткості.

- 4) Вибір матеріалу: дані випробувань на вигин допомагають вибрати найбільш підходящий композитний матеріал для конкретних конструкцій, враховуючи як міцність, так і жорсткість.

- 5) Дослідження і розробки: дослідники використовують випробування

на вигин для розробки нових композитних матеріалів і виробничих процесів, оптимізуючи механічні характеристики.

б) Аналіз відмов: У випадках руйнування конструкцій випробування на вигин допомагають точно визначити причини руйнування і спрямовують вдосконалення дизайну матеріалу.

7) Стандартизація: Методи випробувань на вигин стандартизовані, наприклад, ASTM D790, ASTM C393 і ISO 178, щоб забезпечити загальну основу для порівняння матеріалів і обміну даними.

Випробування композитних матеріалів на вигин проводяться відповідно до встановлених стандартів для забезпечення узгодженості та надійності. Основні стандарти включають:

– ASTM D790: цей міжнародний стандарт ASTM визначає процедури для визначення властивостей на вигин пластмас і властивостей на вигин композитних матеріалів у вигляді балок.

– ASTM C393: цей стандарт зосереджений на властивостях згинання сучасної кераміки при температурі навколишнього середовища і застосовується до композитних матеріалів на основі керамічної матриці.

– ISO 178: цей міжнародний стандарт описує методи визначення властивостей пластмас на вигин, які можуть бути застосовні до композитних матеріалів з полімерними матрицями.

Випробування на удар є важливим методом оцінки здатності композитних матеріалів поглинати і розсіювати енергію при раптовому ударі або ударному навантаженні. Цей метод надає цінну інформацію про в'язкість матеріалу та його стійкість до руйнування в умовах динамічного навантаження.

Процедура проведення ударних випробувань включає:

– підготовка зразка: композитні зразки зазвичай готують у вигляді прямокутних або виїмчастих зразків зі стандартизованими розмірами. Вибір геометрії зразка і конфігурації надрізів залежить від конкретних стандартів випробувань і типу ударного випробування. У деяких випадках зразки

можуть бути витримані при певних температурах або умовах навколишнього середовища, щоб оцінити поведінку матеріалу за різних обставин;

- випробувальне обладнання: випробування на удар проводять за допомогою спеціалізованих випробувальних машин, таких як маятникові ударні копра Шарпі або Ізода, або випробувачі з падаючим вантажем. Ці машини забезпечують контрольоване і відтворюване ударне навантаження;

- ударне випробування: маятник або вантаж відпускається і вдаряє по зразку в заданому місці. Ударне навантаження призводить до деформації зразка і, зрештою, до його руйнування;

- реєстрація даних: під час випробування реєструються дані, пов'язані з подією удару, такі як поглинута енергія, розташування надрізу і глибина надрізу. Ця інформація використовується для оцінки ударної в'язкості матеріалу.

До основних характеристик КМ при ударних випробуваннях відносять:

- ударна в'язкість: енергія, поглинута матеріалом під час руйнування, часто вимірюється в джоулях або фунт-фунтах;

- ударна в'язкість: міра здатності матеріалу поглинати енергію і чинити опір руйнуванню;

- чутливість до надрізів: вплив надрізу або тріщини на здатність матеріалу витримувати удар.

Ударні випробування важливі з кількох причин:

- 1) Оцінка безпеки: це життєво важливо для оцінки безпеки та довговічності матеріалів у застосуванні, де можуть виникати ударні навантаження, такі як автомобільні деталі, спортивне обладнання та структурні компоненти.

- 2) Вибір матеріалу: дані ударних випробувань допомагають інженерам і дизайнерам у виборі матеріалів, здатних витримувати ударні навантаження і протистояти раптовому руйнуванню.

- 3) Контроль якості: ударні випробування використовуються як частина процедур контролю якості, щоб гарантувати, що композитні матеріали

відповідають стандартам безпеки та експлуатаційних характеристик.

4) Дослідження та розробки: дослідники використовують ударні випробування для розробки матеріалів і конструкцій, які покращують ударостійкість, особливо в застосунках з критичними вимогами до безпеки.

5) Аналіз відмов: у разі виходу з ладу матеріалу або компонента внаслідок удару цей метод допомагає виявити причини і сприяє коригувальним діям.

6) Стандартизація: методи ударних випробувань стандартизовані, наприклад, ASTM E23, ASTM D3763 та ISO 179, щоб забезпечити загальну основу для порівняння матеріалів і обміну даними.

Випробування композитних матеріалів на удар проводять відповідно до встановлених стандартів для забезпечення узгодженості та надійності:

– ASTM E23: цей міжнародний стандарт ASTM описує процедури ударних випробувань металів, які також можуть бути застосовані до композитних матеріалів;

– ASTM D3763: цей стандарт визначає процедури для визначення властивостей високошвидкісного проколу пластмас з використанням датчиків навантаження і переміщення. Може застосовуватися для композитних матеріалів з полімерними матрицями;

– ISO 179: цей міжнародний стандарт містить методи визначення ударостійкості пластмас, які можуть бути застосовані до композитних матеріалів з полімерними матрицями.

Випробування на зсув - це метод, який використовується для оцінки стійкості композитних матеріалів до руйнування при зсуві або ковзанні вздовж площин, паралельних прикладеному навантаженню. Ця процедура випробування надає важливу інформацію про поведінку матеріалу під дією напруги зсуву і його здатність протистояти силам, що діють паралельно його поверхні.

Процедура випробування на зсув:

– підготовка зразка: композитні зразки зазвичай готують у вигляді

прямокутних або циліндричних зразків зі стандартизованими розмірами. Вибір геометрії зразка залежить від конкретних стандартів випробувань і типу випробування на зсув;

– монтаж зразка: підготовлений зразок встановлюється в машину для випробування на зсув. Установка оснащена механізмом прикладання навантаження на зсув, яке діє паралельно поверхні зразка;

– прикладання навантаження: установка оснащена механізмом прикладання навантаження на зсув з постійною або заданою швидкістю, в результаті чого зразок деформується і в кінцевому підсумку руйнується. Під час випробування машина реєструє як прикладену силу, так і результуюче зміщення зсуву;

– реєстрація даних: під час випробування безперервно збираються дані, пов'язані з прикладеним навантаженням на зсув, деформацією зсуву і режимом руйнування.

За результатами випробувань визначаються ключові властивості при зсуві, в тому числі межа міцності при зсуві і модуль зсуву, які вказують на стійкість матеріалу до зсуву.

Випробування на зсув важливі з різних причин:

1) Структурний дизайн: надає інженерам і дизайнерам необхідні дані для оцінки придатності матеріалу для застосування в конструкціях, де переважають навантаження на зсув, таких як шви, з'єднання і клейове з'єднання.

2) Контроль якості: випробування на зсув використовується для контролю якості у виробничих процесах, гарантуючи, що композитні матеріали відповідають проектним специфікаціям щодо міцності на зсув.

3) Вибір матеріалу: дані випробувань на зсув допомагають вибрати найбільш підходящий композитний матеріал для конкретних застосувань, де стійкість до зсуву має вирішальне значення.

4) Дослідження і розробки: дослідники використовують випробування на зсув для розробки нових композитних матеріалів і процесів клейового

з'єднання, оптимізуючи механічні характеристики.

5) Аналіз відмов: у випадках руйнування конструкцій, пов'язаних зі зсувом, випробування на зсув допомагають точно визначити причини руйнування і спрямовують вдосконалення дизайну матеріалу.

б) Стандартизація: Методи випробувань на зсув стандартизовані, наприклад, ASTM D732, ASTM D2344 і ISO 14130, щоб забезпечити загальну основу для порівняння матеріалів і обміну даними.

Випробування композитних матеріалів на зсув проводять відповідно до встановлених стандартів для забезпечення узгодженості та надійності:

– ASTM D732: цей міжнародний стандарт ASTM надає рекомендації щодо проведення випробувань на зсув пластмас та інших матеріалів з використанням методу випробування Йосіпеску;

– ASTM D2344: Цей стандарт описує метод випробування на зсув короткою балкою композитів з полімерною матрицею і сендвіч-матеріалів;

– ISO 14130: Цей міжнародний стандарт встановлює процедури для визначення властивостей зсуву композитних матеріалів з використанням методу балки з V-подібними надрізами;

Випробування на стиск - це метод, який використовується для оцінки здатності композитних матеріалів витримувати навантаження, прикладені перпендикулярно до їхньої поверхні (рис. 2.3). Цей метод дозволяє отримати важливі дані про опір матеріалу стискаючим зусиллям і його поведінку під час стиснення.

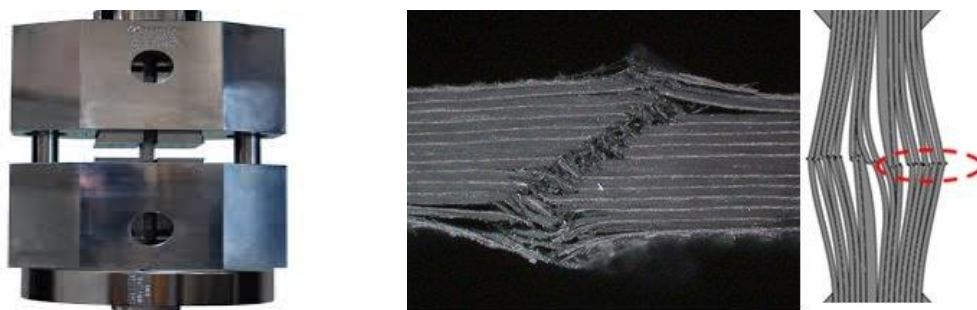


Рис. 2.3. Метод механічних випробувань композиційних матеріалів на стиск.

Процедура випробування на стиск включає наступні етапи:

– підготовка зразка: композитні зразки зазвичай готують у вигляді циліндричних або кубоподібних зразків зі стандартизованими розмірами. Вибір геометрії зразка залежить від конкретних стандартів випробувань і типу випробування на стиск;

– монтаж зразка: підготовлений зразок встановлюється в машину для випробування на стиск. Установка оснащена механізмом прикладання стискаючого навантаження, яке діє перпендикулярно до поверхні зразка;

– прикладання навантаження: установка оснащена механізмом прикладання стискаючого навантаження з постійною або заданою швидкістю, в результаті чого зразок деформується і в кінцевому підсумку руйнується. Під час випробування машина реєструє як прикладену силу, так і результуюче стиснення;

– реєстрація даних: під час випробування безперервно збираються дані, пов'язані з прикладеним стискаючим навантаженням, деформацією стиснення і режимом руйнування.

За результатами випробувань визначаються ключові властивості при стисненні, в тому числі міцність на стиск і модуль пружності при стисненні, які вказують на опір матеріалу до стиснення.

Випробування на стиск важливе з наступних причин:

1) Структурний дизайн: надає інженерам і дизайнерам важливі дані для оцінки придатності матеріалу для застосування в конструкціях, де переважають стискаючі навантаження, таких як колони, опори і елементи конструкцій.

2) Контроль якості: випробування на стиск використовується для контролю якості у виробничих процесах, гарантуючи, що композитні матеріали відповідають проектним специфікаціям щодо міцності на стиск.

3) Вибір матеріалу: дані випробувань на стиск допомагають вибрати найбільш підходящий композитний матеріал для конкретних застосувань, де стійкість до стиснення є життєво важливою.

4) Дослідження і розробки: дослідники використовують випробування на стиск для розробки нових композитних матеріалів і виробничих процесів, оптимізуючи механічні характеристики.

5) Аналіз відмов: у випадках структурних руйнувань, пов'язаних зі стисненням, компресійні випробування допомагають точно визначити причини руйнування і спрямовують вдосконалення дизайну матеріалу.

6) Стандартизація: Методи випробувань на стиск стандартизовані, наприклад, ASTM D695, ASTM D6641 і ISO 604, щоб забезпечити загальну основу для порівняння матеріалів і обміну даними.

Випробування композитних матеріалів на стиск проводять відповідно до встановлених стандартів для забезпечення узгодженості та надійності:

– ASTM D695: цей міжнародний стандарт ASTM містить настанови щодо проведення випробувань на стиск жорстких пластмас;

– ASTM D6641: Цей стандарт описує метод випробування на стиск композитів з полімерною матрицею з використанням пристосування для випробування на стиск під комбінованим навантаженням (CLC);

– ISO 604: Цей міжнародний стандарт встановлює метод визначення властивостей пластмас на стиск, який може бути застосований до композитних матеріалів з полімерною матрицею.

Випробування на твердість - це метод, який використовується для оцінки стійкості композитних матеріалів до вдавнення або подряпин, надаючи інформацію про їхню поверхневу твердість і стійкість до локальної деформації (рис. 2.4). Цей метод є цінним для характеристики твердості композитних матеріалів і розуміння їх здатності протистояти зносу і стиранню.

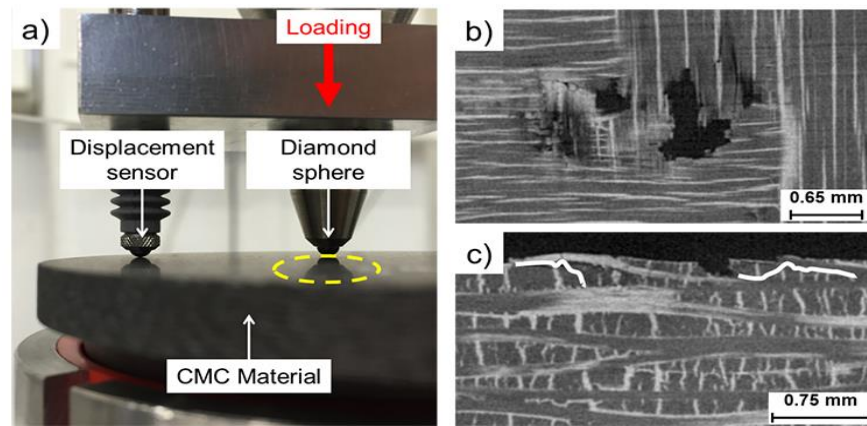


Рис. 2.4. Методи випробування на твердість.

Для оцінки механічних властивостей композитних матеріалів зазвичай використовують кілька методів випробування на твердість:

1) Випробування на твердість за Роквеллом: При випробуванні на твердість за Роквеллом алмазний конус або сталева кулька вдавлюється в поверхню матеріалу під певним навантаженням. Глибина проникнення вимірюється для визначення значення твердості за Роквеллом.

2) Випробування на твердість за Віккерсом: Випробування на твердість за Віккерсом передбачає використання квадратного пірамідального алмазного індентора для створення відбитка на поверхні матеріалу. Розмір відбитка вимірюється для обчислення числа твердості за Віккерсом.

3) Випробування на твердість за Брінеллем: При випробуванні на твердість за Брінеллем кулька з твердої сталі або карбіду вольфраму вдавлюється в поверхню матеріалу під певним навантаженням. Діаметр отриманого вдавнення вимірюється для визначення числа твердості за Брінеллем.

4) Випробування на твердість за Кнупом: При випробуванні на твердість по Кнупу використовується ромбічний пірамідальний алмазний індентор, а для розрахунку значення твердості по Кнупу вимірюється довжина довгої діагоналі індентора.

Випробування на твердість має важливе значення з різних причин:

1) Характеристика матеріалу: надає цінну інформацію про поверхневу твердість матеріалу, що має вирішальне значення для оцінки його

зносостійкості, довговічності і придатності для конкретних застосувань.

2) Контроль якості: випробування на твердість використовується для контролю якості у виробничих процесах, гарантуючи, що композитні матеріали відповідають проектним специфікаціям щодо поверхневої твердості.

3) Вибір матеріалу: інженери та дизайнери використовують дані випробувань на твердість для вибору найбільш підходящого композитного матеріалу для застосувань, де важлива стійкість до зносу та стирання.

4) Дослідження та розробки: дослідники використовують випробування на твердість для розробки нових композитних матеріалів і обробки поверхні, які підвищують твердість і зносостійкість.

5) Аналіз відмов: у випадках відмов, пов'язаних зі зносом або стиранням, випробування на твердість допомагає виявити причини відмов і спрямовує вдосконалення конструкції матеріалу.

6) Стандартизація: Методи випробування на твердість стандартизовані, наприклад, ASTM E18 (за Роквеллом), ASTM E384 (за Віккерсом і Кнупом) і ASTM E10 (за Брінеллем), щоб забезпечити загальну основу для порівняння матеріалів і обміну даними.

Випробування на в'язкість руйнування - це метод, який використовується для оцінки здатності композитних матеріалів протистояти поширенню тріщин і руйнуванню за різних умов навантаження. Ця процедура тестування надає важливу інформацію про стійкість матеріалу до росту тріщин і його здатність протистояти критичним дефектам (рис. 2.5). Нижче наведено детальний огляд та їх значення:

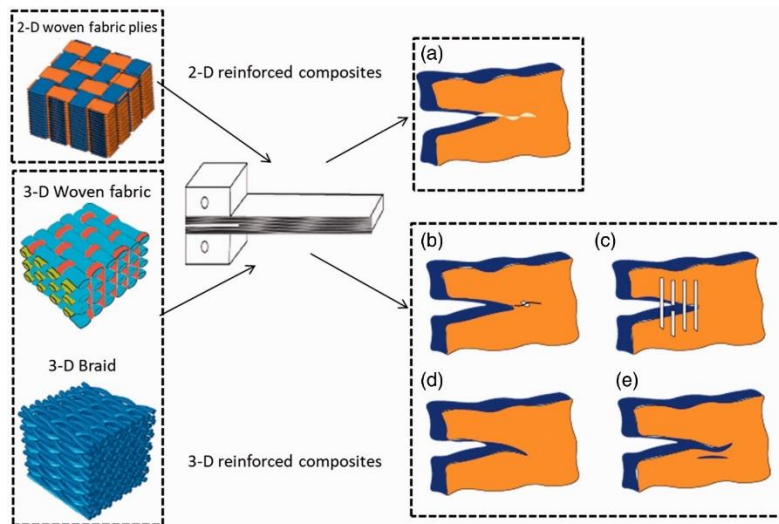


Рис. 2.5. Випробування КМ на в'язкість руйнування.

Випробування на в'язкість руйнування зазвичай включає наступні етапи:

- підготовка зразків: композитні зразки ретельно готують за певними розмірами з надрізами або попередніми тріщинами. Надрізи або попередні тріщини наносяться для того, щоб ініціювати поширення тріщини під час випробування;

- підготовка зразка: у деяких випадках зразки можуть бути витримані при певних температурах або умовах навколишнього середовища, щоб оцінити поведінку матеріалу за різних обставин;

- конфігурація випробування: існують різні методи випробувань на в'язкість при руйнуванні, такі як випробування на однокрайній надрізний вигин (SENB), випробування на компактний розтяг (СТ) і випробування на триточковий вигин. Кожен метод має специфічні процедури і геометрію зразків;

- прикладання навантаження: зразок піддається контрольованому навантаженню, яке створює концентрацію напружень в місці надрізу або попередньої тріщини. Випробувальна машина реєструє як прикладене навантаження, так і розширення тріщини;

- реєстрація даних: Під час випробування безперервно збираються

дані, пов'язані з прикладеним навантаженням, ростом тріщини та іншими параметрами.

Ключовим параметром, отриманим в результаті випробування на в'язкість руйнування, є критичний коефіцієнт інтенсивності напружень. Ця величина характеризує опір матеріалу поширенню тріщин і використовується для прогнозування його поведінки при наявності дефектів або тріщин.

Випробування на в'язкість руйнування є важливим з різних причин:

1) Оцінка безпеки: це життєво важливо для оцінки безпеки і надійності матеріалів в областях застосування, де можуть виникати критичні дефекти або тріщини, наприклад, в аерокосмічних компонентах, посудинах під тиском і елементах конструкцій.

2) Вибір матеріалу: інженери та дизайнери використовують дані про в'язкість руйнування для вибору матеріалів, які можуть протистояти зростанню тріщин і катастрофічним руйнуванням у критичних сферах застосування.

3) Контроль якості: випробування на в'язкість руйнування використовується для контролю якості у виробничих процесах, гарантуючи, що композитні матеріали відповідають проектним специфікаціям щодо тріщиностійкості.

4) Дослідження і розробки: дослідники використовують випробування на в'язкість руйнування для розробки нових композитних матеріалів і виробничих процесів, які підвищують тріщиностійкість і в'язкість руйнування.

5) Аналіз відмов: у випадках руйнування матеріалу через поширення тріщин, випробування на в'язкість руйнування допомагає виявити причини руйнування і спрямовує вдосконалення конструкції матеріалу.

6) Стандартизація: методи випробувань на в'язкість руйнування стандартизовані, наприклад, ASTM E399 і ASTM E1820, щоб забезпечити загальну основу для порівняння матеріалів і обміну даними.

Випробування на в'язкість руйнування композитних матеріалів

проводяться відповідно до встановлених стандартів для забезпечення узгодженості та надійності:

– ASTM E399: міжнародний стандарт ASTM описує процедури вимірювання в'язкості руйнування з використанням підходу лінійно-пружної механіки руйнування (LEFM);

– ASTM E1820: стандарт визначає процедури визначення в'язкості руйнування з використанням методу J-інтеграла, який підходить для широкого спектру матеріалів, включаючи композитні матеріали.

2.2. Огляд методів неруйнівного контролю якості композиційних матеріалів.

Ультразвуковий контроль (УЗК) КМ є одним з найбільш поширених методів оцінки якості КМ на етапах виробництва та експлуатації (рис. 2.6). Ультразвуковий контроль - це неруйнівний метод, який використовує високочастотні звукові хвилі (ультразвукові хвилі) для перевірки композитних матеріалів на наявність внутрішніх дефектів, таких як розшарування, порожнечі і розриви. Він працює за принципом поширення, відбиття та прийому звукових хвиль.



Рис. 2.6. Прилад для ультразвукового контролю композитних матеріалів.

Типова процедура ультразвукового тестування композитних матеріалів включає наступні етапи:

– ультразвуковий перетворювач: ультразвуковий перетворювач генерує високочастотні звукові хвилі. Цей перетворювач може бути контактним (безпосередньо з'єднаним з матеріалом) або занурювальним (розміщеним у водній бані із зануреним матеріалом).

– поширення звукових хвиль: згенеровані звукові хвилі проникають в досліджуваний матеріал. Коли хвилі стикаються з різними шарами, поверхнями розділу або дефектами в композиті, вони зазнають відбиття, заломлення або ослаблення.

– приймальний перетворювач: приймальний перетворювач, часто такий самий, як і випромінюючий, виявляє звукові хвилі, які повернулися після взаємодії з матеріалом.

– аналіз даних: реєструється час, необхідний для проходження звукових хвиль до дефекту і назад. Аналізуючи час та інтенсивність відбитих хвиль, фахівець може визначити місце розташування, розмір і природу дефектів.

Ультразвуковий контроль широко використовується з наступних причин:

1) Виявлення внутрішніх дефектів: Він може виявити розшарування, розшарування, порожнечі та включення, які не видно на поверхні матеріалу.

2) Вимірювання товщини: Ультразвукове тестування може вимірювати товщину композитних матеріалів, що має вирішальне значення для багатьох застосувань.

3) Надійність і точність: Надає точні дані про розмір і глибину дефектів, що дозволяє точно оцінити цілісність матеріалу.

4) Оцінка якості КМ в режимі реального часу: Ультразвукове тестування часто проводиться в режимі реального часу, що робить його придатним для контролю виробничих ліній або польових застосувань.

5) Універсальність: Застосовується до широкого спектру композитних матеріалів і широко використовується в аерокосмічній, автомобільній та будівельній галузях.

Ультразвукове випробувальне обладнання складається з ультразвукових перетворювачів, генератора імпульсів, приймача і дисплея для аналізу даних. Занурювальні баки використовуються для тестування зануренням.

Ультразвукові випробування регулюються різними стандартами, включаючи ASTM E317 і ASTM E588 для ультразвукових випробувань композитних матеріалів.

Радіографічний метод. Радіографічний контроль - це неруйнівний метод, який використовує рентгенівські або гамма-промені для перевірки внутрішньої структури композитних матеріалів (рис. 2.7). Він заснований на принципі, що ці високоенергетичні електромагнітні випромінювання можуть проникати в матеріал, а отримане тіньове зображення виявляє внутрішні дефекти і структури. Типова процедура рентгенографічного контролю композитних матеріалів включає наступні етапи:

1) Рентгенівське або гамма-джерело: Рентгенівський апарат або джерело

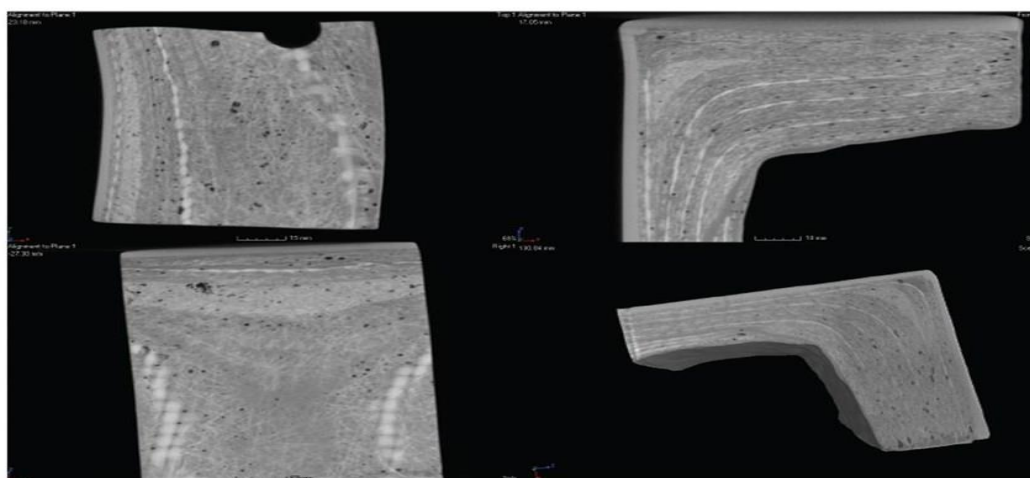


Рис. 2.7. Радіографічна дефектоскопія композитних матеріалів.

гамма-випромінювання випромінює високоенергетичні фотони, які проникають у композитний матеріал, що перевіряється.

2) Взаємодія з матеріалом: Коли рентгенівські або гамма-промені проходять через матеріал, вони або поглинаються, або пропускаються в залежності від щільності і складу матеріалу. Дефекти, такі як порожнечі або розшарування, послаблюють випромінювання і створюють тіньове зображення на іншій стороні.

3) Пристрій для отримання зображень: Пристрій візуалізації, наприклад, рентгенографічна плівка або цифровий детектор, фіксує зображення тіні. Радіографічні плівки записують зображення в результаті хімічної реакції, тоді як цифрові детектори створюють цифрове зображення безпосередньо.

4) Аналіз даних: Зображення аналізується для виявлення та локалізації дефектів у композитному матеріалі. На зображенні можна визначити розмір, форму і розташування дефектів.

Рентгенографічний контроль важливий з наступних причин:

1) Виявлення внутрішніх дефектів: він може виявити внутрішні дефекти, такі як порожнечі, розшарування, включення і сторонні предмети, які можуть бути невидимі на поверхні матеріалу.

2) Висока проникаюча здатність: рентгенівські та гамма-промені мають високу проникаючу здатність, що дозволяє проводити ретельне обстеження товстих композитних структур.

3) Детальне зображення: рентгенографічні зображення надають детальну інформацію про розмір, форму і розташування дефектів, що дозволяє точно оцінити цілісність матеріалу.

4) Порівняння та документування: рентгенограми можна зберігати і порівнювати в часі для контролю якості та відповідності стандартам.

5) Універсальність: застосовується до широкого спектру композитних матеріалів і широко використовується в аерокосмічній, автомобільній та будівельній галузях.

Обладнання для радіографічного контролю включає джерело рентгенівського або гамма-випромінювання, детектори зображень (плівкові або цифрові), а також системи контролю і безпеки.

Радіографічні випробування регулюються різними стандартами, в тому числі ASTM E1742 і ASTM E2597 для радіографічних випробувань композитних матеріалів.

Вихрострумові випробування - це неруйнівний метод, який використовує електромагнітну індукцію для виявлення змін електропровідності або магнітної проникності в композитних матеріалах. Він заснований на принципі, що в матеріалі індуються вихрові струми, а зміни цих струмів використовуються для виявлення дефектів і нерівностей (рис. 2.8).

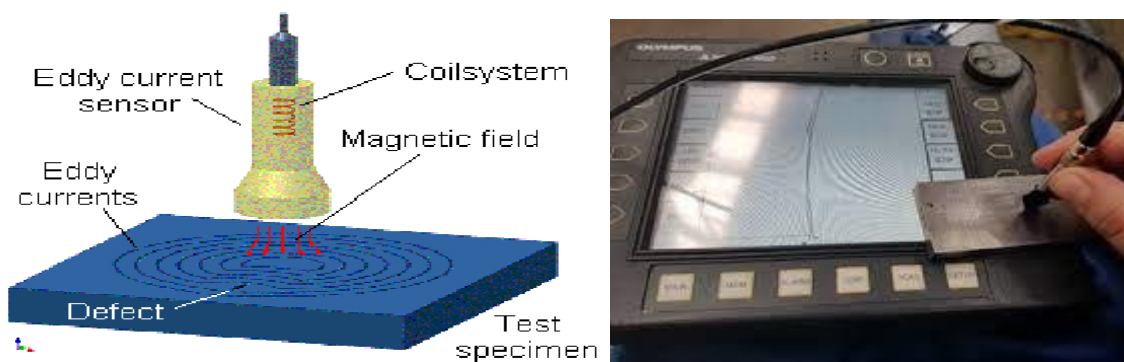


Рис. 2.8. Вихрострумова дефектоскопія (ECT) для композитних матеріалів.

Типова процедура вихрострумової дефектоскопії композитних матеріалів включає наступні етапи:

1) Вихрострумовий зонд: вихрострумовий зонд, також відомий як котушка або датчик, генерує змінний електричний струм під впливом змінного магнітного поля.

2) Індукція вихрових струмів: зонд підноситься в безпосередній близькості до поверхні композитного матеріалу. Зонд індукує вихрові струми в матеріалі.

3) Взаємодія з матеріалом: вихрові струми циркулюють всередині матеріалу і створюють власне магнітне поле. Взаємодія між цими струмами і

дефектами або аномаліями в матеріалі викликає зміни в електропровідності або магнітній проникності, що призводить до зміни поведінки вихрових струмів.

4) Аналіз даних: вихрострумовий зонд вимірює ці зміни і передає дані на прилад для виявлення. Дані аналізуються для виявлення та локалізації дефектів, таких як тріщини, порожнечі та розшарування.

До переваг вихрострумової дефектоскопії відносять:

- виявлення поверхневих і приповерхневих дефектів: метод може виявляти дефекти і аномалії, які розташовані близько до поверхні матеріалу, що робить його особливо корисним для виявлення тріщин і розшарувань;

- швидкий огляд: можна використовувати для високошвидкісних перевірок виробничих ліній, що робить його придатним для контролю якості;

- неінвазивний: не вимагає прямого контакту з матеріалом, що є перевагою для делікатних або крихких композитних поверхонь;

- універсальність: вихрострумові випробування можуть бути адаптовані для різних застосувань, і вони широко використовуються в аерокосмічній, автомобільній промисловості та при визначенні характеристик матеріалів.

Обладнання для вихрострумових випробувань включає вихрострумові датчики, прилади для виявлення і програмне забезпечення для аналізу даних.

Вихрострумові випробування регулюються різними стандартами, включаючи ASTM E3052 і ASTM E2431 для вихрострумових випробувань композитних матеріалів.

Термографічний контроль (NDT), який часто називають інфрачервоною термографією, - це неруйнівний метод, який використовує виявлення теплових картин або теплових градієнтів на поверхні композитних матеріалів для виявлення нерівностей, дефектів або аномалій. Цей метод базується на принципі, що матеріали з різними термічними властивостями будуть демонструвати коливання температури під впливом зовнішнього джерела тепла (рис. 2.9).

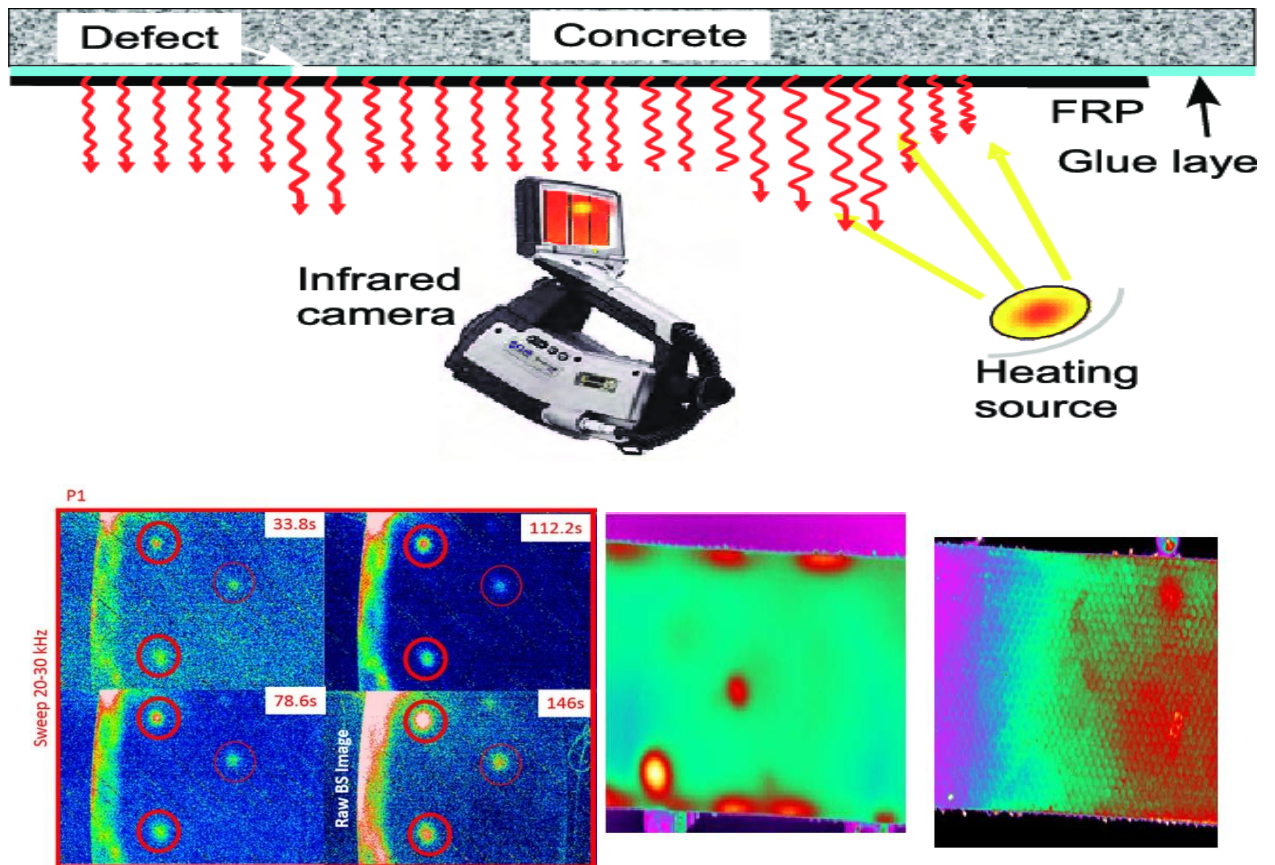


Рис. 2.9. Термографічний контроль композитних матеріалів.

Типова процедура термографічного тестування композитних матеріалів включає наступні етапи:

1) Джерело тепла: зовнішнє джерело тепла, наприклад, теплова лампа, інфрачервона лампа або імпульс спалаху, наноситься на поверхню композитного матеріалу.

2) Теплова реакція: джерело тепла викликає нагрівання матеріалу. Однак різні ділянки матеріалу нагріваються з різною швидкістю через відмінності в термічних властивостях. Дефекти або аномалії впливатимуть на розподіл тепла і теплову реакцію.

3) Інфрачервона камера: інфрачервона камера, також відома як тепловізор, фіксує розподіл температури і теплові картини на поверхні композитного матеріалу.

4) Аналіз даних: тепловізійні зображення аналізуються для виявлення змін, аномалій або гарячих точок на поверхні матеріалу. Ці зміни можуть вказувати на дефекти, розшарування, порожнечі або інші нерівності.

Термографічний контроль важливий з наступних причин:

– безконтактний контроль: це безконтактний метод, що означає, що він не вимагає прямого контакту з матеріалом, що робить його придатним для делікатних або крихких композитних поверхонь;

– виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів: він може виявити дефекти, які знаходяться як на поверхні матеріалу, так і під поверхнею, наприклад, розшарування і порожнечі;

– діагностика в режимі реального часу: термографічне тестування може надавати зображення і дані в режимі реального часу, що робить його придатним для безперервного моніторингу та контролю якості;

– швидка перевірка: це відносно швидкий метод, який можна застосовувати до широкого спектру матеріалів і конструкцій;

– універсальність: застосовується в різних галузях промисловості, включаючи аерокосмічну, будівельну та для визначення характеристик матеріалів.

Обладнання для термографічних випробувань складається із зовнішнього джерела тепла (наприклад, лампи), інфрачервоної камери та програмного забезпечення для аналізу даних.

Термографічні випробування можуть не мати спеціальних стандартів для композитних матеріалів, але, як правило, керуються стандартами, пов'язаними з тепловими зображеннями.

Акустико-емісійний контроль - це неруйнівний метод, який виявляє і аналізує хвилі напружень або акустичну емісію, що генеруються в матеріалах під впливом механічних навантажень. Він заснований на принципі, що вивільнення хвиль напруги надає інформацію про структурну цілісність і дефекти в матеріалі (рис. 2.10).

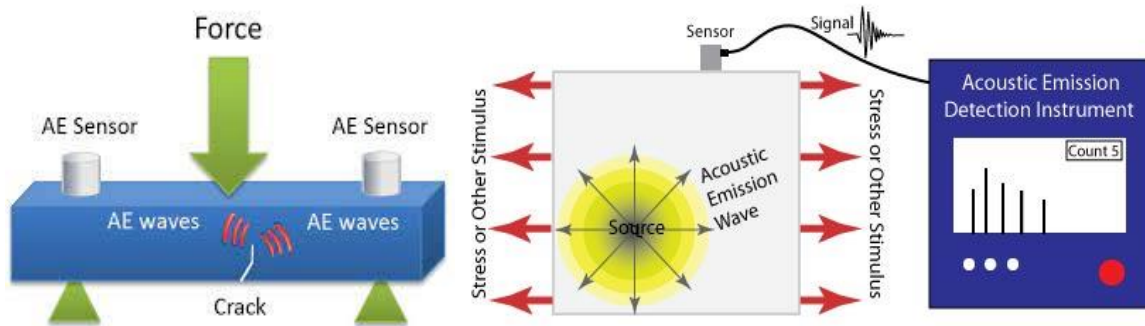


Рис. 2.10. Акустико-емісійна дефектоскопія (АЕ) композитних матеріалів.

Типова процедура акустико-емісійного тестування композитних матеріалів включає наступні етапи:

1) Розміщення датчика: датчики акустичної емісії, також відомі як перетворювачі, стратегічно розміщуються на поверхні композитного матеріалу або всередині структури.

2) Прикладання навантаження: до матеріалу прикладається механічне навантаження, наприклад, розтягнення, стиснення або циклічне навантаження. Навантаження може бути застосоване під час випробувань або в умовах експлуатації матеріалу.

3) Акустична емісія: коли матеріал зазнає навантаження, він генерує хвилі напруги або акустичну емісію. Ці емісії виявляються датчиками і перетворюються в електричні сигнали.

4) Аналіз даних: електричні сигнали аналізуються для оцінки характеристик акустичної емісії, таких як амплітуда, частота і місце розташування. Цей аналіз допомагає виявити дефекти, тріщини та структурні аномалії.

Діагностика КМ методом акустичної емісії важлива з наступних причин: метод надає дані в реальному часі про реакцію матеріалу на навантаження, що дозволяє здійснювати безперервний моніторинг і раннє виявлення дефектів; можна точно визначити місце розташування дефектів і структурних аномалій в матеріалі; акустична емісія чутлива до мікротріщин і дефектів, що дозволяє виявити пошкодження на ранніх стадіях, перш ніж

вони стануть критичними; метод використовується для моніторингу структурного стану композитних матеріалів і може застосовуватися в різних галузях промисловості, включаючи аерокосмічну, цивільне будівництво та виробництво; можна використовувати для визначення характеристик матеріалів і оцінки механічних властивостей композитів.

Обладнання для акустичної емісії включає датчики, системи збору даних і програмне забезпечення для аналізу.

Існують стандарти для тестування акустичної емісії, такі як ASTM E650, який містить настанови щодо тестування композитних матеріалів методом акустичної емісії.

Рентгенівська комп'ютерна томографія (КТ) - це неруйнівний метод, який використовує рентгенівські промені для отримання зображень поперечного перерізу внутрішньої структури композитних матеріалів. Він заснований на принципі поглинання рентгенівських променів, а отримані зображення надають детальну інформацію про внутрішні особливості матеріалу (рис. 2.11).

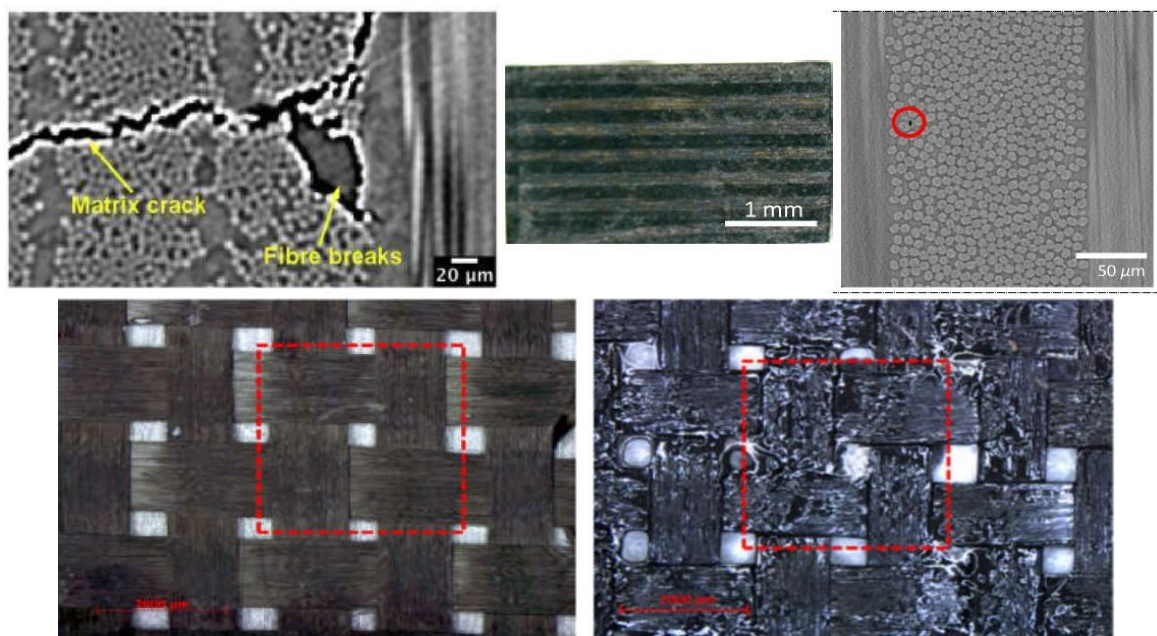


Рис. 2.11. Дефекти КМ, виявлені методом рентгенівської комп'ютерної томографія.

Типова процедура рентгенівської комп'ютерної томографії композитних матеріалів включає наступні етапи:

1) Джерело рентгенівського випромінювання: джерело рентгенівського випромінювання випускає рентгенівські промені, які проходять через композитний матеріал. Рентгенівські промені поглинаються в різному ступені різними компонентами матеріалу.

2) Рентгенівський детектор: з іншого боку матеріалу детектор рентгенівських променів реєструє інтенсивність рентгенівських променів, які пройшли через матеріал.

3) Обертальне сканування: композитний матеріал, як правило, поміщається на обертовий стіл. Під час обертання матеріалу виконується кілька рентгенівських знімків, які фіксують зображення під різними кутами.

4) Реконструкція: комп'ютер обробляє рентгенівські дані і реконструює тривимірне зображення (КТ), яке показує внутрішню структуру матеріалу з високою деталізацією.

5) Аналіз даних: КТ-знімок аналізується для виявлення та локалізації дефектів, пустот, включень та інших структурних особливостей в композитному матеріалі.

До переваг рентгенівської комп'ютерної томографії важлива з наступних причин:

– забезпечення тривимірного зображення внутрішньої структури матеріалу з високою роздільною здатністю, що дозволяє точно виявляти і аналізувати дефекти;

– неруйнівний і безконтактний метод, що означає, що він не пошкоджує матеріал і може застосовуватися до делікатних або крихких композитів;

– можливо виявити внутрішні дефекти, порожнечі, включення і зміни щільності, надаючи комплексне уявлення про структуру матеріалу;

– можливість проводити кількісний аналіз дефектів і властивостей матеріалу, що робить її придатною для досліджень, контролю якості та характеристики матеріалів;

– використовується для визначення характеристик матеріалів, оцінки якості та неруйнівного контролю в різних галузях промисловості, включаючи аерокосмічну, виробничу та дослідницьку.

Обладнання для рентгенівської комп'ютерної томографії включає джерело рентгенівського випромінювання, обертовий столик або гантрі, детектор рентгенівського випромінювання і складне програмне забезпечення для реконструкції та аналізу даних.

Рентгенівська комп'ютерна томографія може не мати спеціальних стандартів для композитних матеріалів, але зазвичай вона використовується відповідно до стандартів рентгенографічного тестування.

Висновки до розділу 2

1. Проаналізовано механічні властивості композитних матеріалів та методи їх визначення, підкреслено важливість того, як ці властивості визначають характеристики матеріалів у відповідних умовах експлуатації.

2. Аналіз методів визначення механічних властивостей КМ відіграє ключову роль у забезпеченні стандартизації та однорідності результатів. Зазначені стандарти відображають важливість регуляції у цій сфері, де точність та надійність даних визначення механічних характеристик є невід'ємною частиною процесу розробки та виробництва композитних матеріалів.

3. Серед регулятивних документів, які розглянуті в даному розділі, виявлено їхню ключову роль у гарантуванні стандартів та якості в області визначення механічних властивостей. Дотримання цих стандартів є критичним для забезпечення порівняності результатів в різних умовах тестування та досліджень, що сприяє вірогідним та об'єктивним висновкам.

4. Розглянуті методи визначення механічних властивостей, у поєднанні

з відповідними стандартами, надають підґрунтя для точного аналізу та оцінки характеристик композитних матеріалів. Це відкриває можливості для удосконалення проектування та виробництва матеріалів з врахуванням їхніх механічних параметрів. Отримані характеристики міцності через ці методи контролю якості, надають важливу інформацію для інженерного проектування та вибору матеріалів для конкретних застосувань.

5. Застосування методів НК на етапах виробництва та експлуатації КМ надасть можливість оцінити якість виробів та конструкцій на всіх етапах життєвого циклу.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ СТАНДАРТІВ НА МЕХАНІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Аналіз стандартів оцінки фізико-механічних характеристик 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, розколювання), 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. 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. 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.

Умови застосування зазначених методів механічних випробувань регламентовані низкою стандартів, які включають умови та процедуру проведення випробувань.

Розглянемо деякі методики стандартів ISO, пов'язаних з механічними випробуваннями композитних матеріалів:

1. ISO 527-1:2012 Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 1: General principles. Методика випробування на розтягнення для пластикових матеріалів, включаючи композити.

2. ISO 527-2:2012 Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. Методика випробування на розтягнення для пластикових матеріалів, зокрема композитів, враховуючи умови лиття та екструзії.

3. ISO 14126:2016 Plastics -- Compression test of dimensionally stable and non-stable plastics. Методика випробування на стиснення для пластиків, включаючи композитні матеріали.

4. ISO 178:2019 Plastics -- Determination of flexural properties. Методика випробування на гнучкість для пластикових матеріалів, що може застосовуватися і до композитів.

5. ISO 14129:2014 Plastics -- Determination of dynamic mechanical properties. Методика визначення динамічних механічних властивостей пластиків, що може бути застосована до композитних матеріалів.

6. ISO 6721-4:2011 Plastics -- Determination of dynamic mechanical properties -- Part 4: Torsion-pendulum method. Методика визначення динамічних механічних властивостей пластиків, включаючи композити, за допомогою методу торсійного маятника.

7. ISO 13003-1:2011 Plastics -- Determination of indentation hardness -- Part 1: Durometer method

Стандарт ISO 527-1:2012 "Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 1: General principles" (Пластики - Визначення механічних властивостей на розтягнення - Частина 1: Загальні принципи) визначає загальні принципи для визначення механічних властивостей пластикових матеріалів методом розтягнення. Він застосовується до широкого спектру пластикових матеріалів, включаючи композити.

Деякі ключові аспекти стандарту ISO 527-1:2012 включають:

1) Визначення проби: стандарт надає вказівки щодо форми та розмірів проби, яку слід використовувати для випробування на розтягнення. Це включає вимоги до довжини та ширини проби, а також параметри геометричних форм.

2) Умови випробування: стандарт встановлює параметри для умов випробування, такі як швидкість навантаження, температура і вологість. Ці умови забезпечують відтворюваність результатів та порівнюваність між різними пробями та лабораторіями.

3) Методика випробування: стандарт описує процедуру випробування на розтягнення, включаючи спосіб навантаження, фіксацію проби та вимірювання деформації та сили. Також надаються вказівки щодо виключення впливу від явищ, таких як статична пружність, кривої розтягнення і т.д.

4) Розрахунок результатів: стандарт визначає методи для розрахунку основних механічних властивостей, таких як напруження при розриві, модуль пружності, розтягнення при розриві і т.д. Також надаються вказівки щодо вибору точки аналізу кривої напруження-деформації.

Стандарт ISO 527-1:2012 є основою для випробування на розтягнення пластикових матеріалів, включаючи композити. Він забезпечує стандартизований підхід до вимірювання механічних властивостей, що дозволяє порівнювати результати між різними матеріалами та лабораторіями.

Стандарт ISO 527-2:2012 "Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics" (Плаستي - Визначення механічних властивостей на розтягнення - Частина 2: Умови випробування для литих та екструзійних пластиків) визначає спеціальні умови випробування на розтягнення для литих і екструзійних пластикових матеріалів, включаючи композити, що виготовляються шляхом лиття або екструзії.

Деякі ключові аспекти стандарту ISO 527-2:2012 включають:

1) Визначення проби: стандарт встановлює вимоги до форми та розмірів проби, які використовуються для випробування на розтягнення литих та екструзійних пластикових матеріалів. Це може включати вимоги до ширини, товщини, розмірів розтягувальної частини та інших параметрів проби.

2) Умови випробування: стандарт встановлює спеціальні умови випробування, які враховують особливості литих і екструзійних пластикових матеріалів. Це може включати вимоги до швидкості навантаження, температури випробування, умов вологості та інших параметрів, які можуть впливати на результати випробування.

3) Підготовка проби: стандарт надає вказівки щодо підготовки проби перед випробуванням, такі як вимоги до розміру і форми проби, рівність товщини, видалення недоліків та інші аспекти, які можуть впливати на точність результатів.

4) Вимірювання параметрів: стандарт описує методи вимірювання параметрів під час випробування на розтягнення, такі як довжина проби, деформація, сила та інші характеристики, які необхідно виміряти для розрахунку механічних властивостей.

Стандарт ISO 527-2:2012 дозволяє виконувати стандартизовані випробування на розтягнення для литих та екструзійних пластикових матеріалів, включаючи композити. Він забезпечує методику та умови, які дозволяють отримувати повторювані та порівнянні результати між різними матеріалами та лабораторіями.

Стандарт ISO 14126:2016 "Plastics -- Compression test of dimensionally stable and non-stable plastics" (Пластики - Компресійне випробування стійких та нестійких по розмірах пластиків) встановлює методику випробування на компресію для пластикових матеріалів, які є стійкими або нестійкими по розмірах. Випробування на компресію вимірює здатність матеріалу протистояти стиску або стискаючі сили.

Ключові аспекти стандарту ISO 14126:2016:

1) Визначення проби: Стандарт надає вказівки щодо форми та розмірів проби, яку слід використовувати для випробування на компресію. Це включає вимоги до діаметра або розмірів проби, а також до її геометричних характеристик.

2) Умови випробування: Стандарт встановлює параметри для умов випробування, такі як швидкість навантаження, температура і вологість. Ці умови забезпечують відтворюваність результатів та порівнюваність між різними пробями та лабораторіями.

3) Методика випробування: Стандарт описує процедуру випробування на компресію, включаючи спосіб навантаження, фіксацію проби та вимірювання деформації та сили. Також надаються вказівки щодо виключення впливу від явищ, таких як ефект Пуассона, статична пружність і т.д.

4) Розрахунок результатів: Стандарт визначає методи для розрахунку основних механічних властивостей, які можуть бути визначені з результатів випробування на компресію, таких як максимальне напруження, модуль пружності та інші.

Стандарт ISO 14126:2016 забезпечує стандартизований підхід до випробування на компресію пластикових матеріалів, включаючи композити, які можуть бути стійкими або нестійкими по розмірах. Він допомагає забезпечити порівнянність та повторюваність результатів між різними матеріалами та лабораторіями.

Стандарт ISO 178:2019 "Plastics -- Determination of flexural properties" (Пластики - Визначення гнучкісних властивостей) встановлює методику для визначення гнучкісних властивостей пластикових матеріалів. Гнучкісні властивості охоплюють такі параметри, як модуль пружності у гнучкості, межу пропорційності, межу текучості, максимальне напруження при згині та інші показники, які характеризують здатність матеріалу протистояти згинанню.

Стандарт ISO 178:2019 надає розгорнуту методику для виконання

випробувань на згинання пластикових проб. Випробування на згинання полягає в прикладанні навантаження до проби в такий спосіб, щоб вона згиналася, і вимірюванні відповідних параметрів, таких як прогин, сила та інші властивості, залежно від обраного методу випробування.

Деякі ключові аспекти стандарту ISO 178:2019 включають:

1) Визначення проби: Стандарт надає вказівки щодо форми та розмірів проби, яку слід використовувати для випробування на згинання. Це включає вимоги до довжини, ширини та товщини проби, а також до її геометричних характеристик.

2) Умови випробування: Стандарт встановлює параметри для умов випробування, такі як швидкість навантаження, температура і вологість. Ці умови забезпечують відтворюваність результатів та порівнюваність між різними пробями та лабораторіями.

3) Методика випробування: Стандарт описує процедуру випробування на згинання, включаючи спосіб навантаження, фіксацію проби та вимірювання деформації та сили. Він надає вказівки щодо виключення впливу від явищ, таких як викривлення контакту і статична пружність.

4) Розрахунок результатів: Стандарт визначає методи для розрахунку основних гнучкісних властивостей, які можуть бути визначені з результатів випробування на згинання, таких як модуль пружності, межа пропорційності та межа текучості.

Стандарт ISO 178:2019 є важливим інструментом для оцінки гнучкісних властивостей пластикових матеріалів. З його допомогою можна встановити порівнянність і стандартизованість результатів між різними випробувальними лабораторіями та матеріалами.

Стандарт ISO 14129:2014 "Plastics -- Determination of dynamic mechanical properties" (Пластики - Визначення динамічних механічних властивостей) встановлює методику для визначення динамічних механічних властивостей пластикових матеріалів. Динамічні механічні властивості включають такі параметри, як модуль пружності, втрати пружності, тангенс

демпфування та інші, які характеризують поведінку матеріалу при зміні навантаження в часі та температурі.

Стандарт ISO 14129:2014 надає детальну методику для виконання випробувань динамічних механічних властивостей пластикових матеріалів. Випробування здійснюється за допомогою динамічного механічного аналізатора (DMA) або іншого відповідного обладнання, яке може забезпечити зміну навантаження в часі та контрольовану зміну температури.

Ключові аспекти стандарту ISO 14129:2014:

1) Умови випробування: Стандарт встановлює параметри для умов випробування, такі як швидкість навантаження, температурний діапазон та частотний діапазон. Ці умови забезпечують відтворюваність результатів та порівнюваність між різними пробами та лабораторіями.

2) Методика випробування: Стандарт надає докладні вказівки щодо підготовки проби, її фіксації в зразку та виконання випробування з вимірюванням змін деформації, сили та інших параметрів в залежності від обраного режиму випробування.

3) Обробка результатів: Стандарт надає рекомендації щодо обробки отриманих даних, включаючи розрахунок модуля пружності, втрати пружності, тангенсу демпфування та інших динамічних механічних властивостей.

Стандарт ISO 14129:2014 дозволяє отримати інформацію про динамічну в'язкість та поведінку пластикових матеріалів при різних температурах та частотах навантаження. Це важливо для оцінки характеристик матеріалу, таких як його жорсткість, еластичність, здатність до поглинання енергії та інші параметри.

Стандарт ISO 6721-4:2011 "Plastics -- Determination of dynamic mechanical properties -- Part 4: Torsion-pendulum method" (Плаستيци - Визначення динамічних механічних властивостей - Частина 4: Метод торсійно-маятничого випробування) визначає методику для визначення динамічних механічних властивостей пластикових матеріалів за допомогою

торсійно-маятникового випробування. Динамічні механічні властивості включають такі параметри, як модуль пружності, втрати пружності, тангенс демпфування та інші, які характеризують поведінку матеріалу при зміні навантаження в часі та температурі.

У методиці торсійно-маятникового випробування проба пластикового матеріалу кріпиться до маятника, який може обертатися. Під час випробування маятник піддається квазістатичному або динамічному навантаженню, і вимірюються параметри, пов'язані зі зміною крутного моменту та кутової деформації.

Стандарт ISO 6721-4:2011 надає детальні вказівки щодо умов випробування, підготовки проби, фіксації та вимірювання параметрів під час торсійно-маятникового випробування. Він також надає методи розрахунку динамічних механічних властивостей з отриманих даних.

Цей метод випробування є важливим для оцінки поведінки пластикових матеріалів при динамічному навантаженні та їх використання в різних застосуваннях. Він дозволяє визначити залежність механічних властивостей матеріалу від температури, частоти та амплітуди навантаження.

Стандарт ISO 13003-1:2011 "Plastics -- Determination of indentation hardness -- Part 1: Durometer method" (Пластики - Визначення індетованої твердості - Частина 1: Метод дюрометра) встановлює методику для визначення індетованої твердості пластикових матеріалів за допомогою дюрометра. Індетована твердість вимірюється шляхом застосування стандартизованого навантаження на поверхню матеріалу за допомогою конічного інструмента.

У методиці дюрометра, конічний інструмент (дюрометр) натискається на поверхню пластикового матеріалу зі стандартизованою силою. Потім вимірюється глибина індетування, яка є показником твердості матеріалу. Застосування стандартизованого методу дозволяє отримати порівняльні результати твердості між різними пробями та матеріалами.

Стандарт ISO 13003-1:2011 надає детальні вказівки щодо процедури

вимірювання індентованої твердості за допомогою дюрометра. Він визначає умови випробування, які включають стандартизоване навантаження, час контакту і зону вимірювання. Також надаються рекомендації щодо вибору типу дюрометра в залежності від очікуваного діапазону твердості матеріалу.

Цей метод випробування широко використовується для визначення твердості пластикових матеріалів, яка може бути важливим показником для оцінки їх механічних властивостей та здатності до зносу. Вимірювання індентованої твердості дозволяє порівнювати матеріали, контролювати якість та встановлювати відповідність стандартам.

Розглянемо деякі методики стандартів ASTM, пов'язані з механічними випробуваннями композитних матеріалів:

1. ASTM D3039 / D3039M - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials
2. ASTM D2344 / D2344M - Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates
3. ASTM D638 / D638M - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
4. ASTM D6641 / D6641M - Standard Test Method for Determining the Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Laminate Plates
5. ASTM D5379 / D5379M - Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method
6. ASTM D790 - Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials
7. ASTM D3518 / D3518M - Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate
8. ASTM D3410 / D3410M - Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading
9. ASTM D4762 / D4762M - Standard Guide for Testing Polymer

Matrix Composite Materials

10. ASTM D5961 - Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates

ASTM D3039 / D3039M є стандартним методом випробування, розробленим ASTM International, для визначення міцності при розтягу, модуля пружності та деформації при розтягуванні композитних матеріалів з полімерною матрицею. Основні ключові аспекти цього стандарту:

1) Визначення міцності при розтягу: ASTM D3039 / D3039M дозволяє виміряти максимальну навантажувальну здатність композитного матеріалу при розтягуванні. Це важливий показник, що характеризує міцність матеріалу і його здатність витримувати розтягуючі навантаження без руйнування.

2) Визначення модуля пружності: модуль пружності вказує на жорсткість матеріалу і його здатність повертатися у вихідне положення після зняття навантаження. ASTM D3039 / D3039M дозволяє виміряти цей параметр, який важливий для конструкційного проектування та визначення поведінки матеріалу під розтягуючими навантаженнями.

3) Визначення деформації при розтягуванні: Методика ASTM D3039 / D3039M дозволяє виміряти деформацію композитного матеріалу при розтягуванні. Це важлива інформація для визначення поведінки матеріалу під навантаженням, зокрема для визначення межі пружності і точки руйнування.

4) Стандартизований метод: ASTM D3039 / D3039M забезпечує стандартизовану методику випробування, що дозволяє отримати об'єктивні результати, які можна порівняти і використовувати для встановлення стандартів якості та специфікацій. Це важливо для забезпечення надійності якості та безпеки композитних матеріалів в різних галузях застосування.

5) Повторюваність та точність: ASTM D3039 / D3039M надає детальні вказівки щодо умов випробування, обладнання та процедур, що сприяє досягненню повторюваності та точності результатів. Це дозволяє отримувати достовірні дані, які можна використовувати для порівняння матеріалів,

валідації дизайну та визначення властивостей матеріалу.

ASTM D3039 / D3039M є важливим стандартом для випробування механічних властивостей композитних матеріалів з полімерною матрицею. Використання цього стандарту дозволяє забезпечити об'єктивні, стандартизовані та повторювані результати, що сприяють розробці та використанню композитних матеріалів у різних галузях, таких як авіація, автомобілебудування, будівництво та інші.

ASTM D2344 / D2344M є стандартним методом випробування, розробленим ASTM International, для визначення міцності композитних матеріалів з полімерною матрицею та їх ламінатів за допомогою короткого згину. Основні аспекти цього стандарту включають:

1) Метод короткого згину: ASTM D2344 / D2344M використовує метод короткого згину для випробування композитних матеріалів. У цьому методі зразок знаходиться під поперечним згинним навантаженням, що дозволяє виміряти міцність матеріалу та його здатність витримувати згинні навантаження.

2) Визначення міцності: ASTM D2344 / D2344M дозволяє виміряти міцність композитного матеріалу при короткому згині. Це важливий параметр, який характеризує стійкість матеріалу до згину та його здатність витримувати згинні напруження без руйнування.

3) Випробування ламінатів: Стандарт ASTM D2344 / D2344M також застосовується для випробування ламінатів, які складаються з декількох шарів композитних матеріалів. Це важливо, оскільки ламінати часто використовуються в конструкціях, і важливо знати їхню міцність та стійкість до згину.

Стандартизований метод: ASTM D2344 / D2344M надає стандартизовану методику випробування, що дозволяє отримати об'єктивні результати, які можна порівняти і використовувати для встановлення стандартів якості та специфікацій. Це дозволяє забезпечити надійність, якість та безпеку композитних матеріалів та їх ламінатів. ASTM D2344 / D2344M є

важливим стандартом для випробування міцності композитних матеріалів та їх ламінатів методом короткого згину. Використання цього стандарту дозволяє отримати об'єктивні дані про міцність матеріалів та їх здатність витримувати згинні навантаження, що є важливим для визначення їхньої придатності для різних застосувань.

ASTM D638 / D638M є стандартним методом випробування, розробленим ASTM International, для визначення розтягнутих властивостей пластикових матеріалів. Основні ключові аспекти цього стандарту включають:

1) Метод розтягування: ASTM D638 / D638M використовує метод розтягування для випробування пластикових матеріалів. У цьому методі зразок знаходиться під поздовжнім розтягуючим навантаженням, що дозволяє виміряти його механічні властивості, такі як міцність при розтягуванні, модуль пружності та відносна подовження.

2) Визначення міцності: ASTM D638 / D638M дозволяє виміряти міцність пластикових матеріалів при розтягуванні. Це важливий параметр, який характеризує стійкість матеріалу до розтягувальних напружень та його здатність витримувати розтягувальні навантаження без руйнування.

3) Модуль пружності: ASTM D638 / D638M також дозволяє виміряти модуль пружності пластикових матеріалів, який характеризує їхню жорсткість та стійкість до деформації при розтягуванні. Цей параметр є важливим для оцінки поведінки матеріалу під дією зовнішніх навантажень.

Стандартизований метод: ASTM D638 / D638M надає стандартизовану методику випробування, що дозволяє отримати об'єктивні результати, які можна порівняти і використовувати для встановлення стандартів якості та специфікацій. Це дозволяє забезпечити надійність, якість та безпеку пластикових матеріалів у різних застосуваннях. ASTM D638 / D638M є широко використовуваним стандартом у промисловості та наукових дослідженнях для оцінки механічних властивостей пластикових матеріалів. Його використання допомагає забезпечити якість та надійність пластикових

виробів та матеріалів у різних галузях.

ASTM D6641 / D6641M є стандартним методом випробування, розробленим ASTM International, для визначення компресійних властивостей ламінованих пластикових матеріалів з полімерною матрицею. Основні аспекти цього стандарту включають:

1) Метод випробування: ASTM D6641 / D6641M використовує метод компресійного навантаження для випробування ламінованих пластикових матеріалів. У цьому методі зразок знаходиться під навантаженням, спрямованим вздовж осі його товщини, що дозволяє виміряти його компресійні властивості, такі як міцність при компресії та модуль пружності.

2) Визначення міцності: ASTM D6641 / D6641M дозволяє виміряти міцність ламінованих пластикових матеріалів при компресії. Цей параметр вказує на здатність матеріалу витримувати компресійні навантаження без руйнування і характеризує його стійкість до стиску.

3) Модуль пружності: ASTM D6641 / D6641M також дозволяє виміряти модуль пружності ламінованих пластикових матеріалів при компресії. Цей параметр вказує на жорсткість матеріалу та його здатність протистояти деформації при компресійних навантаженнях.

Стандартизований метод: ASTM D6641 / D6641M надає стандартизовану методику випробування, що дозволяє отримати об'єктивні результати, які можна порівняти і використовувати для встановлення стандартів якості та специфікацій. Це дозволяє забезпечити надійність, якість та безпеку ламінованих пластикових матеріалів у різних застосуваннях. ASTM D6641 / D6641M є важливим інструментом для випробування та оцінки компресійних властивостей ламінованих пластикових матеріалів з полімерною матрицею, що знайшли широке застосування в авіаційній, автомобільній, морській та будівельній промисловості, а також в інших галузях, де потрібна висока міцність та стійкість матеріалів при компресійних навантаженнях.

ASTM D5379 / D5379M є стандартним методом випробування,

розробленим ASTM International, для визначення зсувних властивостей композитних матеріалів за допомогою методу з вирізом у формі літери "V". Основні ключові аспекти цього стандарту:

1) Метод випробування: ASTM D5379 / D5379M використовує метод зсувного навантаження на зразок композитного матеріалу, який має форму літери "V". У цьому методі зразок знаходиться під зсувним навантаженням, що дозволяє виміряти його зсувні властивості, такі як зсувна міцність, зсувний модуль пружності та зсувний напружений стан.

2) Визначення зсувної міцності: ASTM D5379 / D5379M дозволяє виміряти зсувну міцність композитних матеріалів, яка вказує на їх здатність протистояти зсувному навантаженню без руйнування. Цей параметр є важливим для оцінки міцності та стійкості композитних матеріалів в умовах, коли зсувні сили виникають в системі.

3) Зсувний модуль пружності: ASTM D5379 / D5379M також дозволяє виміряти зсувний модуль пружності композитних матеріалів. Цей параметр вказує на жорсткість матеріалу при зсувних навантаженнях та його здатність протистояти зсувним деформаціям.

Стандартизований метод: ASTM D5379 / D5379M надає стандартизовану методику випробування, що дозволяє отримати об'єктивні результати, які можна порівняти і використовувати для встановлення стандартів якості та специфікацій. Це дозволяє забезпечити надійність, якість та безпеку композитних матеріалів у різних галузях промисловості. Введення ASTM D5379 / D5379M в стандартну практику механічних випробувань композитних матеріалів дозволить забезпечити однорідність, стандартизацію та порівнянність результатів зсувних випробувань, що важливо для визначення механічних властивостей композитних матеріалів та їхнього застосування у вимогливих умовах.

ASTM D790 є стандартом, розробленим ASTM International, для випробування на згин механічних властивостей непідсиленого та підсиленого пластику, а також ізоляційних матеріалів. Основні ключові аспекти цього

стандарту:

1) Методи випробування: ASTM D790 визначає методи випробування на згин для вимірювання флексурних властивостей матеріалів. Два основних методи включають трьохточковий та чотириточковий згин. Вони дозволяють визначити такі параметри, як модуль пружності, межа текучості, межа міцності та прогин.

2) Непідсилені та підсилені пластикові матеріали: ASTM D790 застосовується як до непідсиленого пластику, так і до підсиленого пластику, включаючи композити з різними типами підсилювачів, наприклад скловолокно, карбонове волокно, арамідне волокно та інші. Це дозволяє оцінити механічні властивості різних типів пластикових матеріалів.

3) Ізоляційні матеріали: ASTM D790 також застосовується для випробування електроізоляційних матеріалів, які використовуються у електротехнічних застосуваннях. Вимірювання флексурних властивостей таких матеріалів є важливим для оцінки їхньої механічної міцності та відповідності стандартам електричної безпеки.

Надійність результатів: ASTM D790 надає стандартизовану методику випробування, що забезпечує надійність та порівнянність результатів. Це важливо для стандартизації механічних властивостей матеріалів та для забезпечення якості та безпеки виробів, що використовують ці матеріали.

Введення ASTM D790 до практики механічних випробувань дозволить ефективно визначати флексурні властивості різних пластикових матеріалів та забезпечувати якість, надійність та стандартизацію їхнього застосування у різних галузях промисловості.

ASTM D3518 / D3518M є стандартним методом випробування, розробленим ASTM International, для визначення реакції на плоскопаралельне зсування (in-plane shear response) полімерних композитних матеріалів за допомогою випробування на розтягнення з використанням $\pm 45^\circ$ ламінату. Основні аспекти цього стандарту включають:

1) Метод випробування: ASTM D3518 / D3518M визначає метод

випробування на розтягнення для оцінки реакції на плоскопаралельне зсування композитних матеріалів. Випробування проводиться на $\pm 45^\circ$ ламінаті, що використовується для відтворення типової напруженої структури в композитних конструкціях.

2) Вимірювання параметрів зсуву: Цей стандарт дозволяє визначити такі параметри, як межа міцності на зсув, модуль зсуву та коефіцієнт Пуассона для композитних матеріалів. Ці вимірювання є важливими для оцінки механічної стійкості та деформаційного поведінки матеріалів за умов зсуву.

3) Використання $\pm 45^\circ$ ламінату: Випробування з використанням $\pm 45^\circ$ ламінату є типовим підходом для визначення реакції на зсув у багатьох композитних матеріалах. Цей ламінат відтворює кутову структуру, яка часто зустрічається в реальних композитних конструкціях.

Стандартизовані параметри: ASTM D3518 / D3518M надає стандартизовану методику випробування, що забезпечує надійність та порівнянність результатів. Це дозволяє встановити якісні характеристики реакції на плоскопаралельне зсування композитних матеріалів і порівняти їх з вимогами конкретних застосувань. Застосування: ASTM D3518 / D3518M є цінним інструментом для випробування механічних властивостей полімерних композитних матеріалів. Цей стандарт може бути використаний в галузях, де важлива міцність на зсув, таких як авіаційна, автомобільна, суднобудування, виробництво спорядження та інші. ASTM D3518 / D3518M дозволяє систематично та надійно оцінювати реакцію на плоскопаралельне зсування полімерних композитних матеріалів. Введення цього стандарту до практики механічних випробувань допоможе забезпечити стандартизацію та якість композитних матеріалів, а також підвищить надійність та ефективність їх застосування в різних галузях промисловості.

ASTM D3410 / D3410M є стандартним методом випробування, розробленим ASTM International, для визначення компресійних властивостей композитних матеріалів з полімерною матрицею, які мають непідтримувану

ділянку вимірювання (unsupported gage section), шляхом навантаження на зсув. Основні аспекти цього стандарту:

1) Метод випробування: ASTM D3410 / D3410M описує метод випробування на компресію, застосовуючи зсувне навантаження на непідтримувану ділянку вимірювання композитного зразка. Цей метод вимірює механічну стійкість матеріалу при компресійному навантаженні, що дозволяє оцінити його здатність протистояти стиску.

2) Непідтримувана ділянка вимірювання: Цей стандарт акцентує увагу на непідтримуваній ділянці вимірювання, що є важливим аспектом випробувань композитних матеріалів. Це дозволяє виміряти компресійні властивості саме тієї частини матеріалу, яка найбільше схильна до деформації та впливу навантаження.

3) Вимірювання зсуву: Випробування здійснюється за допомогою зсувного навантаження, що сприяє розрахунку компресійних властивостей матеріалу. Це дозволяє оцінити його здатність до стійкості при стиску та з'ясувати вплив зсуву на його механічні характеристики.

4) Визначення параметрів: ASTM D3410 / D3410M надає методику для визначення таких параметрів, як межа міцності при компресії, модуль пружності та деформаційні характеристики матеріалу. Ці параметри важливі для оцінки поведінки композитних матеріалів при компресійному навантаженні та порівняння їх з вимогами конкретних застосувань.

Цей стандарт може бути використаний в авіаційній, автомобільній, суднобудівній промисловості та інших галузях, де важливо забезпечити оптимальну міцність та стійкість композитних матеріалів при компресійному навантаженні.

ASTM D4762 / D4762M є стандартним посібником, розробленим ASTM International, який надає рекомендації та директиви щодо випробування полімерних композитних матеріалів з полімерною матрицею. Основні ключові аспекти цього стандарту включають:

1) Огляд методів випробування: ASTM D4762 / D4762M містить огляд і

розгляд різних методів випробування, які можуть бути використані для оцінки механічних властивостей композитних матеріалів. Це включає методи для випробування на розтягнення, стиску, зсуву, зносу, удару та інших властивостей матеріалу.

2) Рекомендації щодо випробувальних параметрів: Стандарт надає рекомендації щодо випробувальних параметрів, таких як швидкість навантаження, розміри зразків, температурні умови, засоби фіксації та інші фактори, які впливають на точність та надійність випробувань.

3) Вимоги до звітності: Посібник включає вимоги до звітності результатів випробувань, включаючи формати звітів та обов'язкову інформацію, яка повинна бути вказана. Це дозволяє забезпечити стандартизований підхід до документування результатів та зробити їх зрозумілими для інших користувачів.

4) Використання в індустрії: ASTM D4762 / D4762M є важливим інструментом для випробування та оцінки композитних матеріалів з полімерною матрицею в різних галузях промисловості. Він допомагає забезпечити стандартизацію випробувань, забезпечити однаковість та порівнянність результатів між різними лабораторіями та дослідниками.

5) Дослідження та розвиток: ASTM D4762 / D4762M не тільки надає настанови щодо існуючих методів випробування, але також стимулює дослідження та розвиток нових методів і підходів для оцінки механічних властивостей полімерних композитних матеріалів.

Отже, ASTM D4762 / D4762M є цінним ресурсом для випробування полімерних композитних матеріалів з полімерною матрицею, надаючи рекомендації та стандартизовані методи для оцінки їх механічних властивостей та сприяючи розвитку цієї галузі.

ASTM D5961 є стандартним методом випробування, розробленим ASTM International, для визначення реакції на навантаження в підшипниковій області полімерних композитних ламінатів. Основні ключові аспекти цього стандарту включають:

1) Випробувальний зразок: ASTM D5961 використовує спеціально підготовлений зразок полімерного композитного ламінату з підшипниковою областю. Зразок зазвичай має прямокутну форму з вбудованим підшипником або іншою відповідною конфігурацією.

2) Завантаження: Зразок піддається до прикладання поздовжнього або поперечного навантаження в підшипниковій області. Це може бути здійснено за допомогою випробувальної машини з контрольованою швидкістю навантаження або постійного навантаження.

3) Вимірювання: В процесі випробування вимірюються значення навантаження та відповідної деформації в підшипниковій області зразка. Ці дані використовуються для визначення реакції матеріалу на навантаження та для оцінки його механічних властивостей, зокрема стійкості до навантаження в підшипниковій області.

4) Аналіз результатів: ASTM D5961 надає настанови щодо обробки і аналізу отриманих даних. Це включає розрахунок навантаження, деформації, напружень та інших параметрів, які допомагають зрозуміти поведінку матеріалу під навантаженням в підшипниковій області.

5) Використання в індустрії: ASTM D5961 є важливим стандартом для випробування полімерних композитних ламінатів у важливих застосуваннях, де важлива стійкість до навантаження в підшипниковій області. Цей стандарт допомагає інженерам, дослідникам та виробникам оцінювати та порівнювати механічні властивості полімерних композитів і забезпечувати їх використання відповідно до вимог індустрії.

ASTM D5961 дозволяє визначити стійкість полімерних композитних ламінатів до навантаження в підшипниковій області, що допомагає забезпечити їх ефективно та безпечно використання в різних галузях, включаючи авіаційну, автомобільну, суднобудівну та інші промислові сектори.

3.2 Розробка пропозицій щодо вдосконалення існуючих стандартів

оцінки міцністних властивостей КМ.

Нижче наведено пропозиції щодо додавання методик до зазначених стандартів разом з описом методу і поясненням, чому цей метод може покращити стандартні процедури.

Метод, який можна додати для удосконалення стандарту ISO 527-1:2012 Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 1: General principles: Метод визначення напружено-деформаційних характеристик при високих швидкостях навантаження.

Опис методу: Цей метод дозволяє виміряти механічні властивості матеріалів при високих швидкостях навантаження, що може бути важливим для застосувань, де швидкість навантаження є ключовим фактором, наприклад, у випадку високошвидкісних ударних навантажень або при роботі в динамічних умовах.

Покращення методу: Додавання цього методу дозволить отримувати більш точні і повні дані про механічну поведінку матеріалів при високих швидкостях навантаження, що допоможе забезпечити більш точну оцінку їхньої відповідності до вимог конкретних застосувань.

Метод, який можна додати до стандарту ISO 527-2:2012 Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics: Методика випробування на розтягнення при змінних температурах.

Опис методу: Цей метод дозволяє проводити випробування на розтягнення пластикових матеріалів при різних температурах, що відображає умови, в яких матеріали можуть експлуатуватися. Температурний діапазон випробування може варіюватися залежно від конкретних вимог індустрії.

Покращення методу: Додавання цього методу дозволить здійснювати оцінку впливу температури на механічні властивості пластикових матеріалів. Це важливо для розуміння того, як матеріали ведуть себе в різних умовах експлуатації, допомагає визначити їхню термостійкість і допускає розробку

матеріалів для специфічних температурних режимів.

Метод, який можна додати до стандарту ISO 14126:2016 Plastics -- Compression test of dimensionally stable and non-stable plastics: Методика випробування на стиснення зі змінною швидкістю навантаження.

Опис методу: Цей метод дозволяє виконувати випробування на стиснення пластикових матеріалів при різних швидкостях навантаження. Застосування змінної швидкості навантаження може бути важливим для відображення реальних умов, в яких матеріали піддаються стисненню, наприклад, у випадку ударних навантажень або при роботі в динамічних умовах.

Покращення методу: Включення цього методу дозволить здійснювати випробування пластикових матеріалів за різних швидкостей стиснення, що забезпечить отримання більш повної і точної інформації про їхню стійкість до стиснення в різних умовах.

Метод, який можна додати до стандарту ISO 178:2019 Plastics -- Determination of flexural properties: Методика випробування на гнучкість за змінних температур.

Опис методу: Цей метод дозволяє проводити випробування на гнучкість пластикових матеріалів при різних температурах, що відображає умови, в яких матеріали можуть експлуатуватися. Температурний діапазон випробування може варіюватися залежно від конкретних вимог індустрії.

Покращення методу: Додавання цього методу дозволить здійснювати оцінку впливу температури на механічні властивості пластикових матеріалів при згинанні. Це дасть змогу враховувати реальні умови експлуатації і покращить розуміння прояву матеріалів у різних температурних режимах.

Метод, який можна додати до стандарту: ISO 14129:2014 Plastics -- Determination of dynamic mechanical properties: Методика випробування

динамічних механічних властивостей при змінних частотах навантаження.

Опис методу: Цей метод дозволяє проводити випробування пластикових матеріалів для визначення їхніх динамічних механічних властивостей при різних частотах навантаження. Він відображає умови, в яких матеріали можуть працювати в реальних умовах, де частота навантаження може варіюватися.

Покращення методу: Додавання цього методу дозволить виконувати оцінку залежності динамічних механічних властивостей пластикових матеріалів від частоти навантаження. Це важливо для розуміння поведінки матеріалів при різних умовах експлуатації, що дає змогу враховувати ці фактори при розробці нових матеріалів та визначенні відповідності їхніх властивостей вимогам конкретних застосувань.

Метод, який можна додати до стандарту ISO 6721-4:2011 Plastics -- Determination of dynamic mechanical properties -- Part 4: Torsion-pendulum method: Методика випробування динамічних механічних властивостей при змінних температурах.

Опис методу: Цей метод використовує торсійно-маятникову систему для визначення динамічних механічних властивостей пластикових матеріалів при різних температурах. Випробування проводяться за змінних температурних умов, що дозволяє отримати інформацію про залежність механічних властивостей від температури.

Покращення методу: Додавання цього методу дозволить вивчити вплив температури на динамічні механічні властивості пластикових матеріалів. Це важливо для розуміння того, як матеріали ведуть себе при зміні температури, що забезпечує змогу враховувати цей фактор при розробці матеріалів для різних застосувань.

Стандарт: ISO 13003-1:2011 Plastics -- Determination of indentation hardness -- Part 1: Durometer method

Метод, який можна додати: Методика вимірювання індентувальної твердості за змінних температур.

Опис методу: Цей метод використовує дюрометр для вимірювання індентувальної твердості пластикових матеріалів при різних температурах. Застосування змінної температури дозволяє оцінити вплив температури на твердість матеріалів.

Покращення методу: Додавання цього методу дозволить враховувати вплив температури на індентувальну твердість пластикових матеріалів. Це важливо для оцінки властивостей матеріалів в залежності від температурних умов, що допоможе у розробці матеріалів для різних застосувань і покращить їхню адаптабельність до різних температурних режимів.

Метод, який можна додати до стандарту: ASTM D3039 / D3039M - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials: Методика визначення в'язкості полімерної матриці композитних матеріалів.

Опис методу: Цей метод передбачає вимірювання в'язкості полімерної матриці за допомогою реологічних випробувань. Використання реологічних методів дозволяє оцінити реологічні характеристики матриці, такі як її текучість, в'язкість та залежність від температури.

Покращення методу: Додавання цього методу дозволить отримати більш повну картину про механічні властивості композитних матеріалів, оскільки в'язкість матриці впливає на їхню міцність та деформаційні характеристики. Це сприятиме точнішій оцінці властивостей композитів та поліпшить їхню прогнозовану поведінку.

Метод, який можна додати до стандарту ASTM D2344 / D2344M - Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates: Методика вимірювання впливу середовища на міцність композитних матеріалів.

Опис методу: Цей метод передбачає проведення випробувань на короткострокову міцність композитів за різних умов навколишнього середовища. Це дозволяє оцінити вплив середовища, такого як вологість або температура, на міцність матеріалу.

Покращення методу: Додавання цього методу дозволить з'ясувати, як середовищні умови впливають на міцність композитів. Це важливо для оцінки їхньої стійкості та здатності протистояти впливу навколишнього середовища. Такий підхід допоможе враховувати фактори, які можуть змінювати механічні властивості матеріалів в реальних умовах експлуатації.

Метод, який можна додати до стандарту ASTM D638 / D638M - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics: Методика вимірювання в'язкісно-пружних характеристик пластиків.

Опис методу: Цей метод передбачає вимірювання в'язкості та пружних характеристик пластиків з використанням реологічних випробувань. Він дозволяє встановити залежність між навантаженням та деформацією, а також оцінити зміну цих характеристик залежно від температури та швидкості навантаження.

Покращення методу: Додавання цього методу дозволить отримати більш повну інформацію про реологічні характеристики пластиків, що впливають на їх міцність та деформаційні властивості. Це дозволить точніше прогнозувати поведінку пластикових матеріалів в різних умовах експлуатації і розробляти нові матеріали з покращеними характеристиками.

Метод, який можна додати до стандарту ASTM D6641 / D6641M - Standard Test Method for Determining the Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Laminate Plates: Методика визначення ефекту середовища на стискальні властивості композитних ламінованих пластин.

Опис методу: Цей метод передбачає виконання випробувань на стискальні властивості композитних пластин за різних середовищних умов.

Він дозволяє оцінити вплив середовища, такого як вологість або температура, на стискальну міцність матеріалу.

Покращення методу: Додавання цього методу дозволить з'ясувати, як середовищні умови впливають на стискальні властивості композитних ламінованих пластин. Це важливо для оцінки їхньої стійкості та здатності протистояти впливу навколишнього середовища, особливо у вимогливих застосуваннях. Це також дозволить більш точно моделювати реальні умови експлуатації композитів.

Метод, який можна додати до стандарту ASTM D5379 / D5379M - Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method: Методика вимірювання ефекту температури на зсувні властивості композитних матеріалів.

Опис методу: Цей метод передбачає виконання випробувань на зсувні властивості композитних матеріалів за різних температурних умов. Він дозволяє встановити залежність між температурою та зсувною міцністю матеріалу.

Покращення методу: Додавання цього методу дозволить врахувати вплив температури на зсувні властивості композитних матеріалів. Це особливо важливо для застосування матеріалів у вимогливих умовах, де температура може суттєво впливати на їхню міцність та деформаційні характеристики. Такий підхід дозволить розробляти матеріали з покращеною термостійкістю та адаптувати їх до конкретних умов експлуатації.

Метод, який можна додати до стандарту ASTM D790 - Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials: Методика вимірювання впливу вологості на гнучкість пластикових матеріалів.

Опис методу: Цей метод передбачає виконання випробувань на гнучкість пластикових матеріалів за різних рівнів вологості. Він дозволяє

оцінити залежність гнучкості матеріалу від вологості, що може впливати на його стійкість та механічні властивості.

Покращення методу: Додавання цього методу дозволить з'ясувати, як вологість впливає на гнучкість пластикових матеріалів. Це дозволить точніше моделювати умови експлуатації та розробляти матеріали з покращеною стійкістю до вологи. Такий підхід також допоможе врахувати вплив вологості при проектуванні інженерних конструкцій з пластикових матеріалів.

Метод, який можна додати до стандарту ASTM D3518 / D3518M - Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate: Методика визначення ефекту швидкості навантаження на зсувні властивості композитних матеріалів.

Опис методу: Цей метод передбачає виконання випробувань на зсувні властивості композитних матеріалів з використанням різних швидкостей навантаження. Він дозволяє встановити залежність між швидкістю навантаження та зсувною міцністю матеріалу.

Покращення методу: Додавання цього методу дозволить оцінити вплив швидкості навантаження на зсувні властивості композитних матеріалів. Це важливо для розуміння поведінки матеріалів при різних умовах навантаження, зокрема при швидкому навантаженні. Це допоможе розробляти матеріали з покращеною здатністю абсорбувати енергію при високих швидкостях та враховувати цей аспект при проектуванні структур з композитних матеріалів.

Метод, який можна додати до стандарту ASTM D3410 / D3410M - Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading: Методика вимірювання ефекту орієнтації волокон на стискальні властивості композитних матеріалів.

Опис методу: Цей метод передбачає виконання випробувань на

стискальні властивості композитних матеріалів з використанням різної орієнтації волокон. Він дозволяє встановити вплив орієнтації волокон на стискальну міцність матеріалу.

Покращення методу: Додавання цього методу дозволить врахувати вплив орієнтації волокон на стискальні властивості композитних матеріалів. Оскільки орієнтація волокон може суттєво впливати на механічні властивості матеріалу, це важливо для розуміння його поведінки та оптимізації конструкцій. Додаткова інформація про ефект орієнтації волокон дозволить розробляти матеріали з покращеною стійкістю та міцністю при компресії.

Метод, який можна додати до стандарту ASTM D4762 / D4762M - Standard Guide for Testing Polymer Matrix Composite Materials: Методика вимірювання деградації механічних властивостей під впливом вологості.

Опис методу: Цей метод передбачає виконання довготривалих випробувань під впливом вологості для визначення зміни механічних властивостей композитних матеріалів. Він дозволяє оцінити ступінь деградації матеріалу та з'ясувати, як вологість впливає на його міцність та деформаційні характеристики.

Покращення методу: Додавання цього методу дозволить більш детально вивчити вплив вологості на механічні властивості композитних матеріалів. Це допоможе розробляти матеріали з покращеною стійкістю до вологи та враховувати цей аспект при проектуванні конструкцій. Крім того, знання про деградацію механічних властивостей матеріалу під впливом вологості сприятиме розумінню його довговічності та збереженню стійкості протягом тривалого часу.

Метод, який можна додати до стандарту ASTM D5961 - Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates: Методика визначення впливу кута на тертя у композитних ламінованих пластинах.

Опис методу: Цей метод передбачає виконання випробувань на

визначення тертя в композитних ламінованих пластинах з різною орієнтацією кута. Він дозволяє встановити залежність між кутом орієнтації та коефіцієнтом тертя матеріалу.

Покращення методу: Додавання цього методу дозволить врахувати вплив кута орієнтації на тертя композитних ламінованих пластин. Оскільки тертя важливо для багатьох конструкційних додатків, знання про його залежність від кута дозволить оптимізувати дизайн та вибрати оптимальні орієнтації для покращення тертя матеріалу.

Ці методики нададуть додаткову інформацію про поведінку та властивості композиційних матеріалів, дозволяючи ще більш точно оцінити їхню міцність, стійкість та вплив зовнішніх факторів. Додавання цих методів покращить здатність розробляти нові матеріали, оптимізувати конструкції та забезпечити безпечне та ефективне використання композитних матеріалів у різних галузях.

Висновки до розділу 3

1. Проведено огляд методів та нормативних вимог щодо визначення механічних характеристик композитних матеріалів. Розглянуті стандарти виявили себе як важливий інструмент для оцінки та порівняння механічних властивостей композитів, визначаючи їхню відповідність конкретним технічним потребам та вимогам.

2. Аналіз стандартів дозволив виявити як сильні сторони, так і можливі недоліки у використанні цих методів для визначення характеристик матеріалів. Пропозиція нових методів та покращень цих стандартів стала важливим кроком у вдосконаленні процесу визначення механічних властивостей. Це сприятиме підвищенню об'єктивності, точності та надійності отриманих даних.

3. Запропоновані нові методи вдосконалення стандартів ISO та ASTM відкривають шлях для розширення їхнього застосування в сучасних умовах виробництва та досліджень. Це може сприяти підвищенню ефективності

визначення механічних характеристик композитних матеріалів, що є ключовим для підтримки високих стандартів якості в галузі.

РОЗДІЛ 4

ОСОБЛИВОСТІ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1 Доцільність перероблюваності композитних матеріалів.

Композитні матеріали визначаються як матеріали, які утворені поєднанням двох або більше компонентів. Композитні матеріали поділяються на 3 основні групи: металеві, керамічні та полімерні, і ці матеріали мають переваги або недоліки своїх класів. Сфери використання композитних матеріалів зростає з кожним днем. На сьогоднішній день вони використовуються в багатьох галузях, таких як морська, залізнична, вітроенергетика, космос і авіація, оборонна промисловість, будівництво, автомобілебудування, харчова промисловість та сільське господарство.

Композитні матеріали забезпечують інженерам-конструкторам і інженерам-проектувальникам чудову якість і довгий термін служби. Вища міцність, менша вага та менша потреба в обслуговуванні є важливими коли йдеться про споживання енергії та впливу на навколишнє середовище (викиди CO₂), особливо у транспортному секторі.

Загалом, за типом матричного елемента композитні матеріали можна класифікувати як полімерматричні композити (ПМК), металоматричні композити (МКМ) та кераміко-матричні композити (КМК).

За типом армування композити можна класифікувати як частинки, армовані волокнами, шаруваті та наповнені композити.[31]

Структура композитного матеріалу робить його складним для повторного розділення різних матеріалів. Це створює низку проблем. По-перше, це грошові та енергетичні витрати на переробку матеріалів, порівняно зі створенням первинних матеріалів. Наприклад, ціна первинного скловолокна настільки низька, що жоден існуючий на сьогоднішній день процес не може надати переробленому скловолокну ті ж характеристики, що і первинному скловолокну, за конкурентною ціною. за конкурентною ціною

[32].

По-друге, матеріали завжди мають нижчу вартість, оскільки їхня якість знижується внаслідок процесу переробки процесу переробки та зносу протягом життя, або ж відновлюються до вихідних елементів [33]. Це також проілюстровано на графіку вартості, як показано на рисунку 4.1. Тут показано зміну вартості різних складових відкладається протягом життєвого циклу матеріалів. Якщо повернутися назад, то можна побачити, що втрата цінності, проілюстрована стрілками з пунктирними лініями, стає більшою з кожним кроком. Якщо ми прагнемо зберегти високі механічні характеристики протягом послідовних циклів переробки, важливо оптимізувати процес процес відновлення волокна та уникнення його пошкодження [34], як під час використання продукту, так і як під час використання продукту, так і під час процесу переробки.

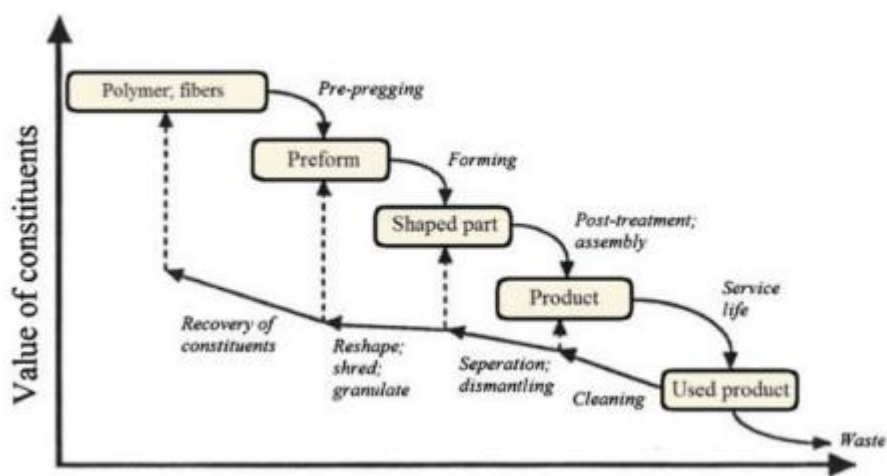


Рис. 4.1 Зміна вартості складових зі збільшенням життєвого циклу

По-третє, оскільки матеріал є менш якісним, він має менше застосувань і складніший у використанні, ніж первинний матеріал. Наприклад, перероблене волокно коротке і пухнасте, що ускладнює його включення їх у новий матеріал через зменшення зв'язку між пухнастими волокнами та новою матрицею [32].

Враховуючи ці недоліки, використання та переробка композитних

матеріалів у нинішній спосіб може не мати сенсу з точки зору сталого розвитку. Композитні матеріали у нинішній спосіб. Це свідчить про те, що необхідно внести зміни в те, як в даний час конструюються композитні матеріали, використовуються та/або переробляються. Бажаний метод переробки повинен забезпечувати матеріали майже первинної якості за ціною, нижчою, ніж створення первинних волокон.[32]

4.2 Методи переробки композитних матеріалів.

4.2.1 Механічна переробка

Механічна переробка композитного брухту є загальним етапом для всіх методів переробки через розмір деяких промислових деталей порівняно з розмірами реакторів. При механічному подрібненні та фрагментації шматки подрібнюються або подрібнюються далі на менші шматки для отримання переробки.

Механічне подріблення :

Механічне подрібнення означає розбиття композитного брухту на дрібні шматки для грубого відокремлення фракцій волокон і смоли.

та смолистих фракцій. Механічне подрібнення досліджувалося як для скло-, так і для вуглецевих композитів, але найбільш масштабні дослідження були проведені для скловолна [35]. Енергетичні витрати на механічне подрібнення знаходяться в межах 0,1-4,8 МДж/кг, залежно від використовуваного обладнання та масштабу процесу. При максимальній продуктивності машини привідні двигуни можуть працювати найбільш ефективно, досягаючи найнижчого рівня енергоспоживання. Живлення двигуна гранулятора або молоткового млина становить більшу частину енергоспоживання становить більшу частину енергоспоживання. Етапи до і після переробки, такі як подрібнення і просіювання, не такі енергоємні, як власне процес переробки енергоємними, як сам процес переробки.

Таблиця 4.1
Механічний процес переробки

	1. Подрібнення	2. Подрібнення/фрезерування	3. Класифікація
Процес	Подрібнювання відходів на частини	Подріблення шматочків на фрагменти	Розділення фрагментів на порошки, багаті на смоли, і волокнисті фрагменти
Розмір частинок ^a	50 – 100 mm	10 mm – 50 μm	-
Обладнання	Повільна швидкість різання або дробарка	Високошвидкісне різання або молотковий млин	Решета та барабани

Спочатку матеріал подрібнюється до шматків розміром 50-100 мм. Це полегшує видалення металевих вставок і, якщо це робиться на місці збору відходів, зменшення об'єму полегшує транспортування.

По-друге, шматки подрібнюються до фрагментів розміром 10 мм - 50 мкм за допомогою ріжучого або молоткового млина. Обидва способи мають свої переваги: різальні млини дають більш однорідний розподіл волокон за довжиною і довші волокна, тоді як молоткові млини не мають лез, які потребують заточування,

що зменшує знос і збільшує продуктивність. Немає суттєвої різниці між цими двома методами щодо вмісту смоли в рецикліті

По-третє, фрагменти розділяють за вмістом і розміром за допомогою циклонів і сит [35]. Важливо зазначити, що повного розділення двох матеріалів не відбувається; фрагменти майже завжди складаються зі змішаних матеріалів.

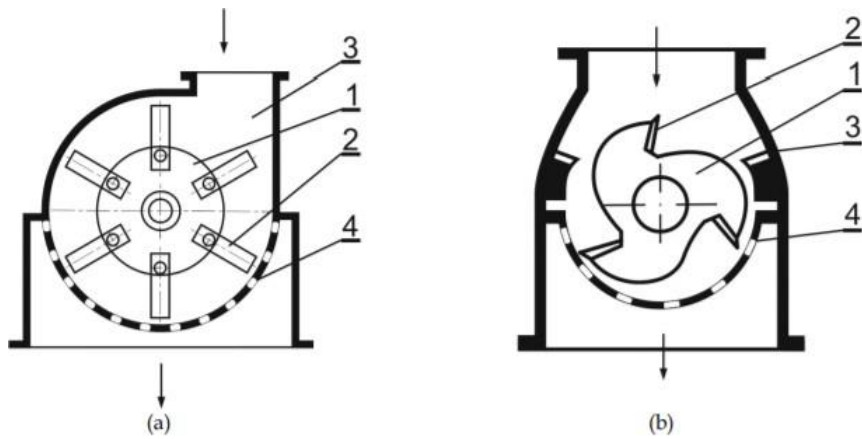


Рис. 4.2 (а) бітерний млин: 1 - ротор, 2 - бітер, 3 - бункер, 4 - сито

(б) ріжучий млин: 1 - ротор, 2 - фреза, 3 - контрфреза, 4 - сито

Відходи механічного подрібнення - це суміші смоли, волокна та наповнювача. У ньому можна виділити дві основні фракції: дрібну і грубу. Дрібні фракції - це порошки з вищим співвідношенням смоли і наповнювача порівняно з вихідним композитом, тоді як грубі фракції є більш волокнистими з вищим вмістом волокон [35].

Щоб навести приклад того, яким може бути склад більш дрібного порошку, багатого на смоли, фракція наповнювача РНХ-200 від Phoenix Fibreglass мала розмір фрагментів 14 мкм з 13% вмісту скла і 87% вмісту наповнювача та органічних речовин [35].

Порошок, багатий на смоли, можна використовувати як наповнювач, але це не є комерційно вигідним через дуже низьку вартість первинних наповнювачів (наприклад, карбонату кальцію або діоксиду кремнію). Крім того, рівень включення в якості наповнювача досить обмежений (<10 мас. %) через погіршення механічних властивостей і збільшення проблем з переробкою при вищому вмісті через вищу в'язкість сполуки [32]. Однак рециклат має нижчу щільність, ніж звичайні наповнювачі, оскільки містить значну частку полімеру з низькою щільністю. Це може призвести до економії ваги на 5% порівняно з використанням лише карбонату кальцію, наприклад. Крім того, хоча замітники наповнювачів дорожчі за вагою, ніж традиційні наповнювачі, нижча щільність означає, що вони дешевші на одиницю об'єму [35]. Це може бути вигідним для галузей, де економія ваги та витрат є дуже

важливою, наприклад, для аерокосмічної промисловості.

Волокнисті фрагменти можуть мати найрізноманітніші форми (наприклад, у вигляді порошоків, пучків з частинками волокон, волокнистих клочків і тканих тромбоцитів), які частково складаються зі смоли. Це ускладнює визначення точних властивостей переробленого волокна, тому в більшості експериментів продуктивність в основному оцінюється шляхом інтеграції матеріалу в нову смолу. Це, однак, ускладнює порівняння рециклату з іншими методами переробки [37]. Довжина фрагментів також варіюється залежно від початкової довжини волокон, типу композиту [37] та розміру подачі брухту. Bream & Hornsby (2001a) повідомляють, що структурна цілісність волокон зберігається, при цьому зберігаються волокна до 10 мм і 69% частинок рециклату діаметром більше 1 мм. Волокна, вироблені компанією ERCOM Composite Recycling в Німеччині, мають розмір частинок або довжину волокон від $<0,25$ мм до 3-20 мм [35].

Загалом можна сказати, що продуктивність рециклату в композитах поступається первинним волокнам [35]. Навіть при низьких показниках реінкорпорації механічні властивості нового композитного матеріалу значно погіршуються через поганий зв'язок між рециклатами та новою смолою [32]. Для покращення зв'язку можуть бути використані додаткові обробки, такі як прищеплення або сполучні агенти (Bream & Hornsby, 2001b) або збільшення часу змішування [32]. Нарешті, важливо, щоб решта первинних волокон була замінена довгими волокнами, оскільки вони компенсують шкідливий вплив рециклату [35].

Волокнистий відхід може бути використаний як наповнювач або як армування для нових композитів з короткими волокнами, таких як об'ємна формувальна суміш (ВМС), деталі з листової формувальної суміші (SMC), а також як включення у вироби, що відливаються під тиском [36]. Використання відходу як армування є більш вигідним способом, оскільки армуюча цінність волокна (частково) зберігається, тоді як наповнювач замінює матеріали з дуже низькою цінністю, а для подрібнення до тонкого

наповнювача потрібно більше енергії (Job et al., 2016).

Механічна переробка має як екологічні, так і економічні переваги. Оскільки при переробці не використовуються хімічні речовини, вона не призводить до забруднення атмосфери або води. Крім того, порівняно з іншими методами, не потрібне високотехнологічне і дороге обладнання, і він дозволяє переробляти більші обсяги відходів з більшою продуктивністю (Ribeiro et al., 2016).

Однак великим недоліком є те, що відновлений рециклат має нижчу якість порівняно з первинним продуктом, як уже згадувалося раніше. Це ускладнює пошук ринкового застосування рециклату, оскільки він навряд чи може конкурувати з первинною сировиною (Ribeiro et al., 2016; Yang et al., 2012). Крім того, для створення та запуску заводу з механічної переробки та виробництва продуктів з рециклату потрібен безперервний потік відходів. Це робить механічну переробку нежиттєздатним рішенням, якщо є лише мінімальна кількість відходів (Vijay, Rajkumara, & Bhattacharjee, 2016). З урахуванням очікуваного обсягу композитних відходів, наприклад, від вітряків, що відпрацювали свій ресурс досягти необхідного обсягу відходів буде нескладно.

Однак, без життєздатного застосування рециклату, проходження всього процесу може виявитися невиправданим або навіть нераціональним.

Фрагментація високовольтними імпульсами:

Високовольтна (імпульсна) фрагментація (HVF) - це електромеханічний процес, який використовує електрику для відокремлення матриць від волокон (Девіч та ін., 2018). Він походить з гірничодобувної промисловості, де його використовували для розриву гірських порід, щоб легше відокремити цінні мінерали та кристали, наприклад, при видобутку золота [36]. При застосуванні до композитів матеріал фрагментується на менші шматочки, що вивільняє волокна.

Енергоефективність процесу залежить від характеристик процесу, таких як кількість імпульсів і швидкість обробки. Під час своїх експериментів

Матівенга та ін. (2016) виявили, що середня ефективність процесу становить 18,1% при швидкості переробки 0,15-0,04 кг/год. Питома потреба в енергії для 500, 1000, 1500 і 2000 електричних імпульсів становила 17,1 МДж/кг, 35,6 МДж/кг, 60,0 МДж/кг і 89,1 МДж/кг відповідно. Найменша кількість імпульсів забезпечує найкращі показники енергоспоживання та ефективності, але це призводить до отримання волокон нижчої якості.

Порівняно з механічним подрібненням (6,7 МДж/кг при 1,2 кг/год), цей процес є більш енергоємним. Для обох процесів важливо, щоб вони працювали на максимальній потужності, щоб використовувати основну потребу машини в енергії [36].

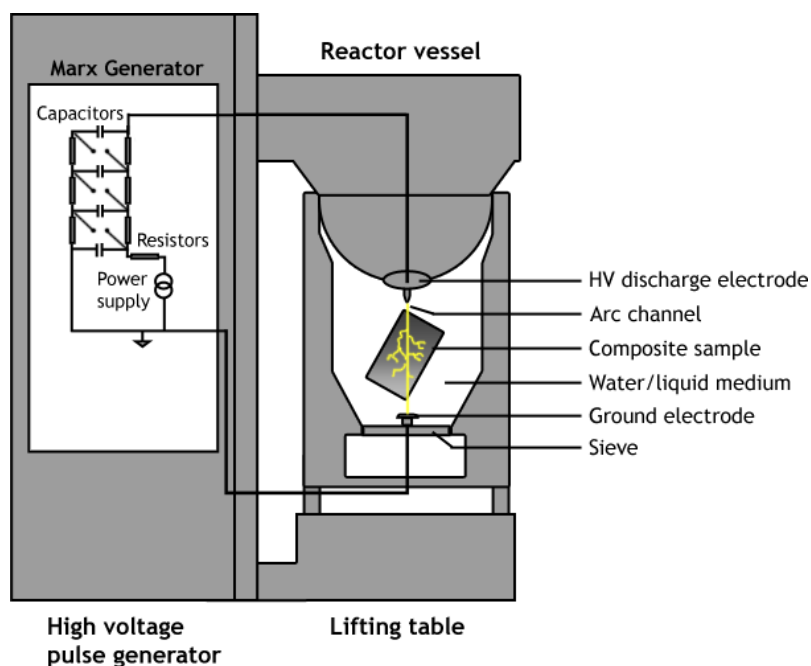


Рис. 4.3 Високовольтна імпульсна фрагментація композитного матеріалу

На рисунку 4.3 показано установку для ВУФ, яка використовує повторювані імпульсні електричні розряди в середовищі діелектричної рідини, як правило, води. Під час HVF матеріал зразка поміщають у проміжок між електродами. Потім імпульси розряджаються за дуже короткий проміжок часу між двома електродами, використовуючи високу напругу (100-200 кВ) при часі наростання імпульсу менше 500 нс. Це створює іскровий канал, який проходить через матеріал вздовж внутрішніх меж і слабких ділянок, таких як

вже існуючі тріщини. Іскровий канал, у свою чергу, генерує інтенсивну ударну хвилю з високим тиском (близько 109-1010 Па) і температурою (> 104 К) та індукує внутрішнє механічне напруження, що перевищує межу міцності твердих матеріалів [37]. Це призводить до відриву матриці від волокна і поширення тріщин [38], що призводить до дезінтеграції матеріалу.

В експерименті Mativenga та ін. (2016) стан видаленої матриці не обговорювався, як і можливості подальшої обробки або переробки. Досліджували лише залишкову смолу на волокнах. Кількість залишкової смоли для HFV варіювалася між 32% і 37%, порівняно з 49-59% для механічного шліфування. Більша кількість імпульсів призводить до меншої кількості залишкової смоли. Для видалення залишкової смоли з волокон Матівенга та ін. використовували температурну обробку протягом 2 годин при $400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Кількість імпульсів впливає на довжину, розподіл по довжині та чистоту волокон. У своєму експерименті Матівенга та ін. (2016) виявили, що велика кількість імпульсів (2000) призвела до великої кількості коротких волокон з вужчим розподілом порівняно з розподілом при використанні меншої кількості імпульсів. Крім того, рециклати скловолокна, отримані з використанням низької кількості імпульсів (500 і 1000), все ще містили погано відокремлені частини смоли, тоді як волокна, оброблені за допомогою 2000 імпульсів, були чистішими і відокремленими.

Порівнюючи рециклат HVF з рециклатом механічної переробки, можна побачити, що волокна з HVF мають ширший розподіл за довжиною, як показано на рисунку 16. Для обох методів середня довжина становила 2 мм, і більшість відновлених волокон були довжиною менше 5 мм, але для HVF максимальна довжина відновлених волокон сягала 9 мм, порівняно з 5 мм для механічної переробки. Це, разом з вищою чистотою волокон, свідчить про те, що рециклати HVF матимуть вищий ступінь армування в нових композитних матеріалах порівняно з рециклатами механічного подрібнення.

Рециклат волокон HVF підходить для тих же застосувань, що і для

механічного подрібнення: використання в коротких волокнах, таких як об'ємні формувальні суміші (BMC), деталі з листової формувальної суміші (SMC) і як включення в литі під тиском вироби [36].

Перевага HVF полягає в тому, що він забезпечує досить добре розділення матриці та волокон при відносно низьких витратах як на початкові інвестиції, так і на експлуатацію [38] Порівняно з механічним подрібненням, він виробляє волокна вищої якості. Волокна чистіші та довші, з більшим розподілом волокон за довжиною та вищим відсотком волокон середньої довжини. Крім того, волокна мають нижчий вміст залишкової смоли. Це означає, що волокна менше піддаються переробці, ніж при механічному подрібненні (Devic та ін., 2018; Mativenga та ін., 2016).

Недоліком HVF є те, що процес є досить енергоємним. За даними Mativenga та ін. (2016), питома енергія для HVF була щонайменше в 2,6 рази вищою, ніж для механічного подрібнення. Для обох процесів потреба в енергії повинна зменшуватися при роботі з вищими показниками переробки завдяки більш ефективній роботі машин. Подальші дослідження необхідні для пошуку оптимального масового завантаження для найбільш ефективного HVF [36]. Іншим недоліком є те, що волокна мають лише помірну якість (близько 20% зниження механічних властивостей), а залишки потрібно промивати кілька разів під час процесу [38]. Тим не менш, були досягнуті певні покращення щодо довжини та якості відновлених волокон, що, здається, вказує на те, що можна досягти більшого [39].

Термічна переробка:

У таблиці 3 наведено огляд термічних методів, які наразі застосовуються для переробки відходів композитних матеріалів . Наступному розділі буде детально розглянуто кожен з цих методів. На практиці методи часто комбінують для досягнення кращих кінцевих результатів. Наприклад, більшість процесів піролізу поєднують з газифікацією або спалюванням для отримання чистіших волокон [40].

На рисунку 17 показано основні відмінності між термічними процесами на

основі характеристик процесу. Найбільш визначальним фактором є кількість доступного кисню: без кисню відбувається піроліз, з обмеженою кількістю кисню O_2 - газифікація, а з надлишком кисню - спалювання або інсинерація. Важливо зазначити, що хоча це два різні процеси, терміни "спалювання" та "інсинерація" іноді використовуються як взаємозамінні. У цьому документі під спалюванням розуміється повне спалювання відходів при високій температурі з утворенням лише попелу, що робить його лише відновленням, а не переробкою. Спалювання, з іншого боку, є більш контрольованим процесом спалювання при нижчій температурі, метою якого є відновлення волокон і наповнювачів з композитних відходів.

Технологічне тепло від екзотермічних методів переробки часто утилізується через систему утилізації тепла відходів як джерело енергії. Теплотворна здатність композиту, як правило, залежить лише від теплотворної здатності та частки полімеру, оскільки більшість волокон і наповнювачів є негорючими. Більшість розглянутих композитних смол мають теплотворну здатність приблизно 30 000 кДж/кг [35], що є високим показником порівняно із загальною теплотворною здатністю побутових відходів (коливається від 7 500 до 11 000 кДж/кг). Деякі мінеральні наповнювачі розкладаються і поглинають енергію під час горіння, особливо антипірени, але кількість поглинутої енергії невелика (близько 3-6%) порівняно з теплотворною здатністю смоли [35].

Таблиця 4.2

Огляд методів термічної обробки композитних матеріалів

	Визначення	Енергія	Вихідні дані	Типи
Спалювання	Повне спалювання Температура: > 850 °C а або > 1100 °C б	Екзотермія Отримано енергія дорівнює приблизно	Рекуперація енергії та попіл	- Решітчаста піч для випалу - Оберткова піч сміттєспалювальна піч
Горіння	Контрольоване горіння	дорівнює теплотворній	Переробка волокна +	- Киплячий шар горіння

	Температура: 450-600 °C c	здатності теплотворної здатності смол	наповнювача та рекуперація енергії	
Спільна обробка	Спалювання та включення залишків вцемент Температура: 1050-2000 °C	(приблизно 30 МДж/кг для більшості смол е)	Рекуперація енергії та попіл + мінерали, які можна використовуватися як цемент сировина	- Спільна обробка в цементній печі
Піроліз	Термічне розкладання полімерів (в інертній атмосфері) Температура: 300-800 °C d	Endotherm Енергетичні витрати складають 23-30 МДж/кг (5-10 МДж/кг для мікрохвильовий піролізу)	Тверді речовини (50-75%): волокна, наповнювачі та деревне вугілля Рідини (10-50%): суміш органічних сполук Газ (5-15%): суміш CO ₂ , CO і гідро- та вуглеводнів вуглеців	- Ланцюговий конвеєр - Обертова піч - Мікрохвильова піч - Перегріта пара - Каталітична - Газифікація

4.3 Економія на вторинній переробці

Якщо розглядати комерційну життєздатність переробки, то цінність полягає, головним чином, у відновлених волокнах. Тому якість і ціна перероблених волокон диктуватимуть процес комерціалізації, що є основним бар'єром для більшості методів на даний момент [33]. Легше досягти економічної доцільності для композитних вуглецевих волокон і методів, що забезпечують більшу довжину волокон, оскільки вони мають вищі грошові та експлуатаційні показники і, отже, можуть перероблятися в менших масштабах.

Як зазначалося раніше, методи термічної переробки часто комбінують для

отримання волокон кращої якості з меншим вмістом залишків смоли, що має не лише експлуатаційні, але й економічні переваги. Наприклад, поєднання піролізу з газифікацією також дозволяє отримати паливний газ з помірною теплотворною здатністю і стане конкурентним вибором у майбутньому. Однак поєднання технологій робить процес дорожчим; це не завжди може бути доступним, коли потрібен піроліз [40]. Щоб підвищити економічну життєздатність дорожчих (термохімічних) методів переробки, необхідно знайти спосіб вилучення цінних продуктів зі смол. Крім того, ціни на смоли слідує за динамікою цін на нафту, тому вона також може бути цінним дешевим джерелом мономерів, необхідних для виробництва смол [32].

Висновки до розділу 4.

Проведено аналіз доцільності переробки композитних матеріалів. Проаналізовані існуючі методи переробки, наведені переваги та недоліки цих методів.

Також наведено економічні аспекти доцільності цих методів. Досліджено й обговорено можливості економії через використання вторинної переробки, зокрема у контексті оптимізації виробництва та забезпечення екологічної безпеки.

ВИСНОВКИ

У даній дослідницькій роботі проведено глибокий аналіз стандартизації та властивостей композитних матеріалів, що розкриває важливість стандартизованого підходу до оцінки та регулювання якості цих матеріалів. Розділ, присвячений стандартизації, уважно розглядає роль стандартів ISO та ASTM у визначенні якості, безпеки та механічних характеристик композитів. Далі у роботі вивчаються різноманітні механічні характеристики композитних матеріалів, такі як розтяг, вигин, ударна в'язкість, зсув, стиск, твердість та в'язкість. Цей аналіз глибоко досліджує поведінку матеріалів у різних умовах навантаження, сприяючи кращому розумінню їхньої міцності та можливостей застосування.

Також у роботі детально розглядаються та оцінюються методи контролю якості композитних матеріалів, від ультразвукового контролю до радіографії та інших технік, для виявлення потенційних дефектів та забезпечення високої якості виробів.

Останній розділ роботи присвячений критичному аналізу та вдосконаленню стандартів ISO та ASTM, що є ключовим для подальшого розвитку цих стандартів та запропонованих методів для точного визначення властивостей та якості композитних матеріалів.

.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Авіаційне управління США (FAA) - Стандарти повітрядоступності
FAA - Стандарти повітря доступності
2. Європейське агентство з безпеки авіації (EASA) - Специфікації
сертифікації
3. Американське товариство з неруйнівного контролю (ASNT) -
Неруйнівний контроль "Mechanics of Composite Materials" by Autar K.
Kaw.
4. ASTM D3039 - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer
Matrix Composite Materials.
5. ISO 527 - Plastics - Determination of Tensile Properties.
6. "Composite Materials: Design and Applications" by Daniel Gay, F. Wayne
E. Johnson, et al. "Mechanics of Composite Materials" by Robert M. Jones.
7. "Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering" by Sohail Rana,
Raul Figueiro, et al. "Composites in Aerospace Applications" by Eugenio
Oñate, et al.
8. ASTM D790: Standard Test Methods for Flexural Properties of
Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials
9. ISO 178:2019 Plastics .Determination of flexural properties.
10. ASTM International - Standard Test Method for Shear Properties of
Composite Materials
11. Society for Experimental Mechanics (SEM) - Shear Testing of Composite
Materials
12. Composite Science and Technology - Effects of fiber orientation on shear
strength of composites
13. Journal of Materials Science - The effect of matrix properties on the shear
behavior of composites.
14. ASTM D3039 / D3039M - Standard Test Method for Tensile Properties of
Polymer Matrix Composite Materials
15. ASTM D2344 / D2344M - Standard Test Method for Short-Beam Strength

- of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates
16. ASTM D638 / D638M - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
 17. ASTM D6641 / D6641M - Standard Test Method for Determining the Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Laminate Plates
 18. ASTM D5379 / D5379M - Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method
 19. ASTM D790 - Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials
 20. ASTM D3518 / D3518M - Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate
 21. ASTM D3410 / D3410M - Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading
 22. ASTM D4762 / D4762M - Standard Guide for Testing Polymer Matrix Composite Materials
 23. ASTM D5961 - Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates
 24. ISO 527-1:2012 Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 1: General principles Методика випробування на розтягнення для пластикових матеріалів, включаючи композити.
 25. ISO 527-2:2012 Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics Методика випробування на розтягнення для пластикових матеріалів, зокрема композитів, враховуючи умови лиття та екструзії.
 26. ISO 14126:2016 Plastics -- Compression test of dimensionally stable and non-stable plastics. (Методика випробування на стиснення для пластиків, включаючи композитні матеріали.)
 27. ISO 178:2019 Plastics -- Determination of flexural properties

(Методика випробування на гнучкість для пластикових матеріалів,
що може застосовуватися і до композитів.)

- 28.ISO 14129:2014 Plastics -- Determination of dynamic mechanical properties
(Методика визначення динамічних механічних властивостей
пластиків, що може бути застосована до композитних матеріалів.)
- 29.ISO 6721-4:2011 Plastics -- Determination of dynamic mechanical
properties -- Part 4: Torsion-pendulum method(Методика визначення
динамічних механічних властивостей пластиків, включаючи
композити, за допомогою методу торсійного маятника.)
- 30.ISO 527-1:2012 "Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 1:
General principles" (Пластики - Визначення механічних властивостей на
розтягнення - Частина 1: Загальні принципи).
31. «The Recyclability of Composite Materials» Umut Ozgur OZALTAY ,
Alper GUNOZ and Memduh KARA
32. Oliveux, G., Dandy, L. O., & Leeke, G. A. (2015). Current status of
recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and
resulting properties. *Progress in Materials Science*, 72, 61–99.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>
33. Yang, Y., Boom, R., Irion, B., van Heerden, D. J., Kuiper, P., & de Wit, H.
(2012). Recycling of composite materials. *Chemical Engineering and
Processing: Process Intensification*, 51, 53–68.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.09.007>
34. Longana, M. L., Ong, N., Yu, H. N., & Potter, K. D. (2016). Multiple closed
loop recycling of carbon fibre composites with the HiPerDiF (High
Performance Discontinuous Fibre) method. *Composite Structures*, 153, 271–
277. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.06.018>
35. Pickering, S. J. (2005). Recycling technologies for thermoset composite
materials—current status. *Advanced Polymer Composites for Structural
Applications in Construction: ACIC 2004*, 37, 1206–1215.
<https://doi.org/10.1016/B978-1-85573-736-5.50044-3>

36. Mativenga, P. T., Shuaib, N. A., Howarth, J., Pestalozzi, F., & Woidasky, J. (2016). High voltage fragmentation and mechanical recycling of glass fibre thermoset composite. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(1), 45–48. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.107>
37. Bluhm, H., Frey, W., Giese, H., Hoppé, P., Schultheiß, C., & Sträßner, R. (2000). Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 7(5), 625–636. <https://doi.org/10.1109/94.879358>
38. Bax, L., Vasiliadis, H., Magallón, I., Ierides, M., & Zaman, B. (2015). Composites recycling.
39. Devic, A.-C., Ierides, M., Fernández, V., Verbenkov, M., & Bax, L. (2018). *Suschem Polymer Composites Circularity White paper*. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(79\)90103-4](https://doi.org/10.1016/0010-4361(79)90103-4)
40. Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2015). Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management*, 37(12), 116–136. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.022>