

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет будівництва, архітектури та дизайну
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістра
(ступінь вищої освіти)

на тему

ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЙ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Виконав: студент 2 курсу, групи БАД-211м

Спеціальності 132 «Матеріалознавство»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

«Композиційні та порошкові матеріали,
покриття»

ЧАЙКОВСЬКИЙ С.
(прізвище та ініціали)

Керівник д.т.н., проф. МІТЯЄВ О.
(прізвище та ініціали)

Рецензент к.т.н., доц. КАПУСТЯН О.
(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Будівництва, архітектури та дизайну
 Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність 132 «Матеріалознавство»
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Олександр МІТЯЄВ
 « 30 » 09 2022 року

ЗАВДАННЯ
 НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Чайковського Сергія Андрійовича
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Підвищення механічних властивостей конструкцій з полімерних композиційних матеріалів»

керівник проєкту (роботи) Олександр МІТЯЄВ, д.т.н., професор
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 01 » 09 2022 року № 268

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 16 грудня 2022 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) вихідні властивості полімерних композиційних матеріалів; заводська технологія виготовлення; обладнання та устаткування

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Основні вимоги до ПКМ та їх властивості. 2. Фактори, що впливають на властивості ПКМ. 3. Методи забезпечення та підвищення ПКМ. 4. Матеріали та методики дослідження. 5. Розроблення технології підвищення механічних і фізичних властивостей конструкцій з ПКМ. 6. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентація

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

РЕФЕРАТ

Робота складається з 64 сторінок, 22 рисунка, 4 таблиць, 23 джерела.

Об'єкт досліджень – механічні та фізичні властивості конструкцій з полімерних композиційних матеріалів.

Мета роботи – розробка технології підвищення механічних властивостей конструкцій з ПКМ, порівняння значень та характеру отриманих механічних та фізичних властивостей з існуючою технологією виготовлення, що використовується в даний час на виробництві.

Метод дослідження – комплексний з використанням стандартних методик, що викладені в нормативній літературі.

У дипломній роботі вирішуються питання впливу виробничих факторів та технологій на формування деталей з ПКМ; підготовки зразків та режимів їх полімеризації; порівняння значень випробовувань зразків в залежності від їх обробки та технології виготовлення.

Виконана дипломна робота включає такі складові: літературний огляд технічної інформації за темою дипломної роботи; опис характеристик матеріалів і технологій пов'язаних з їх формуванням, режимами полімеризації, обробки зразків та їх випробуванням; методики, що застосовували в процесі дослідження; оброблення експериментальних даних; порівняння та підтвердження отриманих значень випробовувань; висновки.

ПОЛІМЕР, КОМПОЗИТ, ЗРАЗОК, МІЦНІСТЬ, МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ, ТЕМПЕРАТУРА СКЛУВАННЯ, ПРУЖНІСТЬ, ДЕФОРМАЦІЯ, КОЛИВАННЯ

ABSTRACT

The research work consists of 64 pages, 22 figures, 4 tables, 23 sources.

The object of the researching work is the mechanical and physical properties of structures made of polymer composite materials.

The thesis deals with the issue of the influence of production factors and technologies on the formation of PCM parts; of the preparation of samples and modes of their polymerization; of the comparison of sample test values depending on their processing and manufacturing technology.

Completed research work includes the following components: literary review of technical information on the topic of the research work; description of the characteristics of the materials and technologies related to their formation, modes of the polymerization, processing of samples and their testing; methods used in the research process; experimental data processing; comparison and confirmation of the obtained test value; conclusions.

POLYMER, COMPOSITE, SAMPLE, STRENGTH, MODULUS OF ELASTICITY,
GLASS TRANSITION TEMPERATURE, DEFORMATION, OSCILLATIONS

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначок, одиниць і термінів.....	8
Вступ.....	9
1 Підвищення механічних і експлуатаційних характеристик полімерних композиційних матеріалів.....	12
1.1 Основні вимоги до ПКМ та їх властивості.....	12
1.1.1 Класифікація композитів.....	14
1.1.2 Властивості полімерних композитів.....	16
1.2 Види матриць та наповнювачів. Способи поєднання.....	17
1.3 Фактори, що впливають на властивості ПКМ.....	20
1.3.1 Температура склування.....	22
1.3.2 Вплив температури на механічні властивості в'язкопружного матеріалу.....	23
1.4 Методи забезпечення та підвищення властивостей ПКМ.....	24
1.4.1 Міцність та механізми руйнування ПКМ.....	26
1.4.2 Вплив армувальних наповнювачів на властивості ПКМ...	28
1.4.3 Функціональні наповнювачі.....	30
1.5 Основні переваги і недоліки ПКМ.....	31
1.6 Визначення мети та задач досліджень.....	33
2 Матеріали та методики дослідження.....	34
2.1 Вибір і обґрунтування методів випробувань.....	34
2.1.1 Загальні вказівки.....	34
2.1.2 Сутність методу ДМА.....	34
2.1.3 Підготовка зразків до випробувань.....	34
2.2 Матеріали та обладнання.....	36
2.3 Динамічний механічний аналіз.....	37
2.3.1 Обладнання для ДМА.....	38
2.3.2 Основний принцип методу ДМА.....	43

2.3.3 Види впливу на зразки при ДМА.....	45
2.4 Вимоги до безпеки та охорони навколишнього середовища.....	46
3 Розроблення технології підвищення механічних і фізичних властивостей конструкцій з ПКМ.....	48
3.1 Технологія виготовлення досліджуваної деталі.....	48
3.2 Технологія підготування та обробки зразків.....	50
3.3 Порядок проведення випробувань.....	53
3.4 Порядок оброблення експериментальних даних.....	54
3.5 Результати порівняння виробничої технології з розробленою...	55
Висновки.....	61
Перелік джерел посилань.....	63

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

ДМА – динамічний механічний аналіз;

ПКМ – полімерний композиційний матеріал;

МКМ – металевий композиційний матеріал;

ЧПК – числове програмне керування;

МФШ – міжфазний шар;

ASTM – American Society for Testing and Materials (американське товариство з випробування матеріалів);

поз. – позиція;

T_g – температура склування;

E – модуль пружності (модуль Юнга);

$\tan \delta$ – тангенс кута механічних втрат.

ВСТУП

Поєднуючи речовини з різними властивостями, можна отримати новий композиційний матеріал. Найвідоміший приклад такого матеріалу – залізобетон. Це матеріал, що складається з металевої арматури та бетону, без якого неможливо було б зводити високі будівлі. Армувальний наповнювач – металеві прутки – мають більш високий модуль пружності, ніж бетон, що підвищує жорсткість матеріалу, тобто дозволяє витримувати більші навантаження та опиратись дії коливальних навантажень. Міцність залізобетону у напрямі армування значно вища, ніж у простого бетону (без армування). Можна будувати порівняно легкі та високі конструкції, які не будуть втрачати стійкості та руйнуватись під власною вагою чи зовнішніми навантаженнями. За таким принципом влаштовані інші конструкційні композити.

Всі композиційні матеріали складаються з матриці та жорсткого армувального наповнювача. Як правило, армувальний наповнювач у полімерних композитах – вуглецеві або скляні волокна, а матриця – полімерний матеріал, як правило, синтетична смола. Найчастіше застосовують термореактивні смоли. При нагріванні вони утворюють полімерну сітку, через що матриця стає жорсткою та хімічно стійкою. З цих матеріалів можна створювати легкі деталі, що за міцністю перевершують металеві [1].

Їхнє застосування актуальне скрізь, де важливі легкість та міцність, в першу чергу в авіації: від ваги літака залежить витрата палива, а від міцності та ремонтпридатності конструкцій з ПКМ – їх довговічність, надійність та безпека пересування. В автомобільній промисловості з вуглепластиків роблять спорткари, боліди, елітні моделі легкових автомобілів та електрокари. Все, що рухається швидко, зараз намагаються робити з композитів.

У конструкції літака з композиційних матеріалів можна виготовити фюзеляж, крила, хвостове оперення, деталі інтер'єру. Найчастіше для літаків

застосовуються легший вуглепластик, а склопластик – для навантажених деталей та носового обтічника. Склопластик важчий, ніж вуглепластик, і менш міцний, але він значно дешевший. Носовий обтічник літака роблять зі склопластику тому, що ця деталь повинна пропускати радіохвилі, а вуглецеве волокно проводить струм та створює перешкоди [1].

Застосовувані в даний час в конструкціях літаків та вертольотів ПКМ є в основному вугле-, скло- та органопластики на основі епоксидних або епоксифенольних в'язучих. Прогноз структури застосування основних конструкційних матеріалів в планері літака показує, що частка ПКМ до 2023 р. зросте до 40% (рис 1.1) [2].

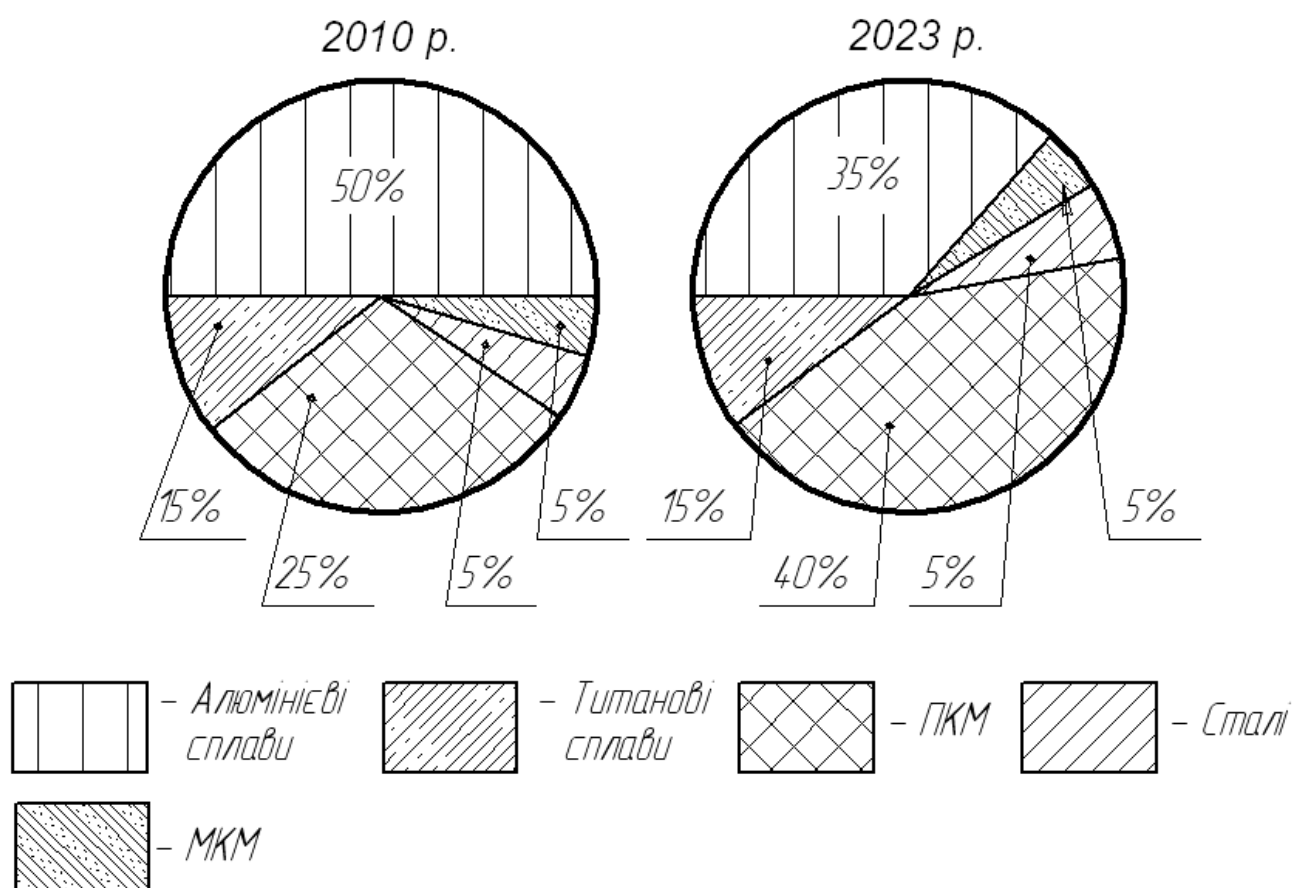


Рисунок 1.1 – Застосування основних конструкційних матеріалів у цивільній авіації

Не можна замінити полімерними композиційними матеріалами деталі двигуна, оскільки полімери не витримують температури. Стійки шасі не

роблять із композитів, тому що на них діє високе ударне навантаження; металевими залишаються рухомі частини, наприклад, деякі елементи механізації крила.

Композиційні матеріали удосконалюються: міцність та легкість матеріалу залежать від інжинірингу деталі, виду наповнювача. Розробники постійно покращують параметри вуглецевих волокон, змінюють типи викладок та удосконалюють технології формування [1].

Використання автоклавів для формування великих деталей можуть дозволити собі лише великі виробники, та світові тенденції спрямовані на відмову від автоклавних технологій та здешевлення виробництва [1].

Використання композитів дозволяє зменшити кількість частин деталі, тим самим прискорюючи загальне збирання, та отримувати вироби складної форми. На відміну від металів, композити не схильні до втоми. У той же час полімерні композити мають ряд недоліків: композиційні матеріали поки що значно дорожчі, ніж метали, та їх використання окупається лише за тривалої експлуатації [3].

1 ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ І ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Основні вимоги до ПКМ та їх властивості

- Висока адсорбційна здатність поверхні наповнювача, що забезпечує надійні зв'язки між матрицею та наповнювачем, а також запобігає зростанню та розповсюдженню тріщин.
- Висока температура склування, що забезпечує високі експлуатаційні показники стійкості до впливу температури на матрицю.
- Низька відносна густина, що забезпечує надійність та міцність конструкцій, що мають відносно велику площу (об'єм) до своєї дійсної ваги.

Полімерними композитами називають багатокомпонентні матеріали на основі різних видів полімерів. Полімери служать у таких матеріалах матрицею, тобто середовищем, основним в'язучим компонентом, який скріплює між собою інші. Інші матеріали у складі полімерного композиту – це зазвичай різноманітні армувальні чи декоративні склади, які надають композиту певних властивостей [4].

При інших рівних ПКМ можуть мати більш оптимальні фізико-хімічні параметри та нижчу вартість, ніж традиційні склади. Їх властивості можна регулювати на етапі створення композиту: параметри залежать від армуючого наповнювача, підсилювальних добавок (модифікаторів) та полімерних смол, які використовуються у процесі формування. Композити можуть відрізнятися показниками тепло- та електропровідності, жаро- та вологостійкості, міцності та твердості, жорсткістю та іншими параметрами. Але все ж таки є властивості, справедливі для більшості композитних матеріалів на основі полімерів [5].

Властивості композиційного матеріалу визначають не тільки матриця та наповнювач, а також й технологія їх отримання. Завдяки волокну зміцнення йде

завдяки одному напрямку – вздовж волокна. Щоб досягти високої міцності, композит викладають шарами змінюючи по черзі напрямки основи тканини – міцність вирівнюється в довжину та ширину. Щоб зміцнити матеріал у третьому напрямку, шари можуть бути вертикально прошиті додатковими волокнами з напрямком основи тканини $\pm 45^\circ$, або робити розкрій під певним кутом. Задаючи напрямки волокон у матеріалі, ми визначаємо його властивості. Кожна деталь індивідуальна, а кожен тип виробу з ПКМ має свою викладку – залежно від того, у яких напрямках до нього буде прикладене навантаження. Правильність викладки стрічки волокна, для певної деталі, розраховують виходячи з властивостей волокон і матриці [6].

Слабке місце полімерних композитів – ударна міцність. Після удару в деталі з композиційного матеріалу утворюються мікротріщини, які при циклічних навантаженнях призводять до розшарування матеріалу. Для того щоб полімерні композити краще витримували ударні навантаження, розробляють спеціальні в'язучі, до складу яких вводять термопласти або використовують термопластичні матриці [6].

Спочатку технологія була схожа на виготовлення пап'є-маше: брали волокно, промазували пензлем смолу та укладали наступний шар. Деякі виробники виготовляють у такий спосіб досі, але залишається ризик людського фактору. Людина не здатна чітко, на око, просочувати тканину смолою, витримуючи потрібне співвідношення в'язучого до наповнювача (тканини). Завжди є ризик того, що тканина залишиться сухою в певному місці, а це неприпустимо для відповідальних деталей з ПКМ. Сухість тканини, а отже, відсутність матриці, яка захищає арматуру від впливу механічних пошкоджень, впливає на надійність виробу, його міцність, здатність витримувати коливальні навантаження. Також при ручному просочуванні пензлем є ризик потрапляння на тканину сторонніх включень, які після полімеризації можуть перетворитися на концентратори напружень. Наразі процес виробництва прагнуть максимально автоматизувати [7].

1.1.1 Класифікація композитів

Полімери діляться на два основні класи: термореактивні та термопластичні. Перші зазвичай є порівняно низьков'язкими рідинами (при температурі переробки), які після просочення армувальним матеріалом (волокна, нитки, стрічка, тканина) за рахунок хімічних реакцій перетворюються на неплавку тверду полімерну матрицю. Цей хімічний процес називається полімеризацією. Друга група – лінійні полімери, які можуть при підвищенні температури багаторазово переходити до рідкого розплавленого стану [8].

Армувальні добавки бувають листовими та волокнистими – це, відповідно, листи (плівки) та волокна певних матеріалів. Дисперсні добавки представлені порошкоподібними масами. Розмір часток має значення: від нього залежать властивості кінцевого матеріалу. Наприклад, композити з наповнювачами, розміром менше $0,1 \cdot 10^{-6}$ мм окремої частинки, називаються нанокompозитами та можуть змінювати властивості навіть за незначних коливань у співвідношенні матеріалів [8].

Є різні способи як поєднати матрицю та наповнювач. Найпоширеніший в авіації – формування препрегів. Заздалегідь просочену в'язким та викладену в кілька шарів тканину (препрег) поміщають в автоклав, куди подають високий тиск та температуру. Полімерні сполучні в'язкі, тому при викладанні між шарами утворюються порожнечі, які потрібно прибрати під високим тиском – бульбашка газу просто розчиняється в матриці. Також, для недопущення утворення пустот, перед полімеризацією конструкції з ПКМ, застосовують підпресування за допомогою герметичного мішка. По контуру деталі, на стіл або пристосування, наносять джгут для герметизації, встановлюють мішок з поліетиленової плівки, приєднують вакуумний штуцер та витримують під вакуумом певний час, в залежності від складності та габаритів деталі. Деталі, що мають осьову симетрію, наприклад, фюзеляжі літаків, щогли вітрильників або вітрогенераторів, отримують намотуванням просоченого в'язким волокна на вал, що обертається, після чого їх також поміщають в автоклав [7].

Склопластики. Це досить дешеві матеріали з високими, зручними у використанні властивостями, що складаються із полімерної матриці та скловолоконних армувальних включень. Скловолокно є наповнювачем і може становити до 80% від складу. Виходить матеріал, який одночасно має переваги скла, такі як хімічна інертність та міцність, але позбавлений його недоліків – зайвої крихкості та ваги. Склопластики легкі, їх складніше зруйнувати, вони можуть бути навіть прозорими [8].

Вуглепластики. Як наповнювач у таких складах використовуються сполуки вуглецю: від вуглеводнів до целюлози. Вуглецеві добавки можуть бути представлені у вигляді ниток, тканин або волокон. Вихідна речовина проходить через три етапи підготовки: окислення, карбонізацію та графітизацію, – в результаті чого з нього випаровуються всі побічні сполуки. У кінцевому складі – до 99,5% вуглецю. Цей вуглець змішують з полімером і одержують міцну, жорстку речовину чорного кольору, що по ряду характеристик перевершує метал. Вуглепластики здатні витримувати високі навантаження, проводять електричний струм, але за своїх унікальних показників міцності залишаються дуже легкими – це робить їх цінним компонентом для зниження ваги конструкцій [8].

Текстоліти. Спочатку текстоліти являли собою композитні матеріали на основі полімеру та тканини (органічної, мінеральної), зараз це набагато різноманітніша група складів. В основі, як і раніше, лежить полімерна матриця, а як наповнювач використовується полотно з ниток: це можуть бути бавовняні, вуглецеві, базальтові або азбестові, скляні волокна. Тому різняться й властивості, та сфера застосування текстолітів. З текстолітових пластин можуть виготовляти деталі, що амортизують або ізолюють, вузли машин, що працюють в агресивних середовищах та ін. [8].

1.1.2 Властивості полімерних композитів

Міцність. Завдяки використанню полімерів та особливим хімічним зв'язкам усередині речовин, ПКМ досить міцні в порівнянні з традиційними пластмасами. Вони можуть не поступатися міцністю натуральній кераміці чи металу. Це, звичайно, справедливо лише для певних видів матеріалів, але, наприклад, вуглепластики можуть перевищувати за міцністю метали [9].

Низька вага. При високій міцності композити мають меншу вагу, ніж альтернативні матеріали. Причина цього – використання полімерів, які, як правило, мають меншу густину, ніж метали та сплави на їх основі. Навіть якщо наповнювач – важка речовина, за рахунок змішування з полімером кінцева вага буде нижчою [9].

Низьке температурне розширення. Показник температурного розширення – того, наскільки активно матеріал розширюється під впливом тепла, – відрізняється для різних видів композитів. Але в середньому цей показник нижчий, ніж у металів, пластмас та ін. Це означає, що композитний матеріал здатний краще зберігати властивості при зміні температури, така особливість важлива при створенні термостійких об'єктів [9].

Низька теплопровідність. Композити на основі полімерів погано проводять тепло, а отже мають високі теплоізоляційні властивості. Завдяки цьому тепло не проходить через матеріал і не розігріває всю масу композиту, що важливо у величезній кількості сфер – від побуту до ракетобудування [9].

Змінна електропровідність. Полімерні композити в залежності від складу можуть бути діелектриками, так і провідниками. Деякі з них, наприклад, текстоліти, використовують як основи для електронних схем і плат, інші застосовуються в електротехніці як провідні матеріали. Можна отримати склад з тим рівнем електропровідності, який потрібен для конкретного завдання [9].

Хімічно-біологічна стійкість. Висока стійкість до зовнішніх впливів й у полімерів і, відповідно, для складів на їх основі. Такі матеріали зазвичай добре

витримують вплив агресивних середовищ, але рівень стійкості конкретного композиту залежить від його складу [9].

1.2 Види матриць та наповнювачів. Способи поєднання

При формуванні ПКМ в реакції беруть участь два компоненти, тобто будь-який композит являє собою сукупність як мінімум двох, призначених для спільної роботи твердих тіл, полімерної матриці та наповнювача, а також міжфазного шару (МФС) [10, 11]. При цьому полімери складаються з макромолекул, а неорганічні наповнювачі з атомів. У формуванні властивостей ПКМ важливу роль відіграє інтенсивність міжфазної взаємодії. Прилеглий безпосередньо до межі поділу полімер – наповнювач обсяг полімеру-матриці має структуру та властивості, що відрізняються від таких в обсязі. Поступовий перехід МФШ у прилеглі фази (матрицю на наповнювач) не дозволяє точно визначити його товщину s . Тому товщина міжфазної зони умовно приймається рівною відстані, на якій склад і структура МФШ заданим чином відрізняється від тих параметрів суміжних фаз. Таким чином, фізико-механічні властивості наповнених матеріалів насамперед визначаються їх структурою, елементами якої є полімерне в'язуче – матриця, наповнювач та міжфазний шар (зона). З модельного уявлення (рис. 1.2) випливає, що межа поділу двох різнорідних фаз являє собою не поверхню, а міжфазну, що включає декілька шарів – розгалужений шар матриці, міжфазний шар і приповерхневий шар [10].

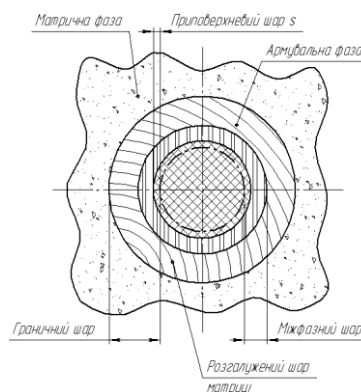


Рисунок 1.2 – Модельне уявлення про міжфазний шар у системі полімер-тверде тіло [11]

Шарувата міжфазна зона, що відрізняється за властивостями від обох прилеглих фаз, утворених вихідними компонентами, за своєю сутністю є третьою фазою ПКМ, вплив якої поки що частіше проявляється стихійно і важко прогнозується. Міжфазний шар, як правило, істотно відрізняється від матричної фази за складом – він вбирає в себе апрет, замастилювач та інші низькомолекулярні включення в'язучого та поверхні наповнювача. Структурні відмінності, обумовлені впливом наповнювача, виявляються в одних випадках зміною ступеня затвердіння, в інших – ступеня кристалоутворення прилеглого полімеру [10, 11].

Розмір МФШ істотно залежить від інтенсивності взаємодії полімеру з твердою поверхнею. Особливістю МФШ у полімерах є їхня значна протяжність. Це особливо характерно для кристалічних полімерів, де поверхня наповнювача може ініціювати кристалізацію при охолодженні розплаву, і тоді вся маса полімеру виявляється дрібнокристалічною, порівняно з полімером без наповнювача. Процес формування ПКМ та його властивості залежать від адгезійної взаємодії межі поділу. Адгезійна взаємодія, як окремий етап формування ПКМ, іноді не розглядається, а враховуються тільки технологічні параметри процесу та властивості міцності отриманого адгезійного з'єднання. При поєднанні різнорідних матеріалів показники міцності композиту визначаються областями з найбільшими градієнтами властивостей, так як вони мають найменшу міцність. Адгезійна міцність служить кількісною мірою адгезії, тобто сил зчеплення адгезиву та субстрату. Тому межу поділу (МФШ) часто розглядають як третій компонент композиту. Міцність та стійкість адгезійних зв'язків є основним фактором працездатності ПКМ [10, 11].

При використанні порошків металів як наповнювачів полімерів необхідно враховувати, що на межі поділу полімер-метал, особливо при формуванні композицій з розплавів полімерів, протікають складні фізико-хімічні та фізичні процеси, що включають розчинення та окислення поверхні металу, відновлення металів з оксидів поверхневих шарів, насичення поверхні металів атомами, що входять до складу полімеру, структуроутворення тощо [12].

Інтенсивність міжфазної взаємодії залежить від часу контакту фаз (рис.1.3). Через певний час контакту опір відшарування досягає граничного значення [13].

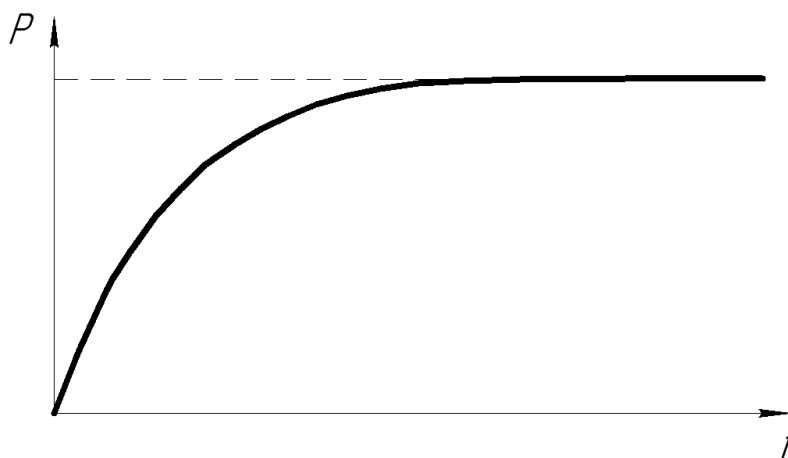


Рисунок 1.3 – Зміна зусилля відриву P матричного полімеру від підкладки (наповнювача) зі зміною часу контакту t [13]

Для формування адгезійних сполук характерні три стадії [13]:

- 1 – створення фізичного контакту;
- 2 – активація поверхонь та момент утворення зв'язків;
- 3 – розвиток релаксаційних процесів у в'язучому.

Перша стадія залежить від в'язкості адгезиву, чистоти та шорсткості поверхні, температури та тиску. Поверхні не бувають ідеально рівними та практично завжди забруднені адсорбованими речовинами. Поверхня має кілька шарів дефектних макромолекул та надмолекулярних структур, низькомолекулярні речовини та домішки. Тому великий вплив приділяється підготовці поверхонь. Для активації металів застосовуються хімічне травлення та механічна обробка [13].

Друга стадія формування адгезійної сполуки пов'язана з виникненням міжмолекулярних та хімічних зв'язків. Якість композиту визначається часом знаходження з'єднаних компонентів у фізичному контакті та ступенем їх активації. Цього можна досягнути тільки за умови повного змочування в'язучим поверхні наповнювача, а також при певному співвідношенні між модулями пружності наповнювача та в'язучого [13].

Витрати енергії на другій стадії необхідні для активації поверхні та зближення молекул до відстані дії міжмолекулярних сил. Враховуючи, що поверхня полімерних матеріалів має специфічну структуру та властивості, для отримання міцного з'єднання необхідна енергія на перебудову конформаційного набору, морфології та структури для нової поверхні поділу [13].

Третя стадія утворення адгезійної сполуки визначається дифузійними процесами, відповідальними за вирівнювання складу перехідної області, релаксацію внутрішніх напруг і формування кінцевої структури композиту.

Таким чином, ПКМ є системами з чітко вираженою неоднорідністю структури. Їх характеристики пружності та міцності визначаються не тільки механічними властивостями та типом компонентів, а й умовами взаємодії на межі поділу фаз та взаємодією між неоднорідними елементами. Тому побудова адекватної моделі наповненої системи та розрахунок її механічних характеристик досі залишаються актуальними завданнями механіки та композиційних матеріалів [13].

1.3 Фактори, що впливають на властивості ПКМ

- Недотримання режимів полімеризації конструкцій з ПКМ може призвести до розшарування, або надмірної ламкості, крихкості, тобто зменшення міцності через перегрівання перегрів, а отже деструкції (деградації) молекулярних зв'язків [14, 15].
- Слідкування за навколишньою температурою місця викладки препрегів забезпечує потрібну в'язкість в'язучого, а отже не допускає витоку смоли з просоченої тканини, що забезпечує відсутність «сухості» композиту (відсутності в'язучого на поверхні), а також формування заданого профілю деталі [14, 15].
- Недотримання вимог до нанесення антиадгезійних покриттів, що забезпечують легке виймання конструкцій з пристосувань (прес-форм) та

відсутність складок на поверхні препрегів, що тягнуть за собою внутрішні дефекти, які можуть виступити концентраторами напружень та знизити надійність та міцність конструкції [14, 15].

Розробка полімерних матриць для ПКМ – серйозна та важлива проблема, оскільки багато властивостей композитів багато в чому визначаються матрицею. Насамперед, саме матриця пов'язує волокна один з одним, створюючи монолітний матеріал. Матриця перерозподіляє напруги між сусідніми дисперсними частинками чи волокнами, захищає наповнювач від шкідливого впливу навколишнього середовища. Безперервна матриця сприймає зовнішні навантаження та передає їх частинкам другої фази. Одночасно матриця перешкоджає зростанню тріщин за рахунок відносно високої пластичності або місцевого відшарування від волокна або дисперсної частинки [9].

Наскільки реалізуються високі механічні властивості волокон залежить від таких властивостей матриці, як міцність, жорсткість, пластичність, в'язкість руйнування та ударна в'язкість. Температурна поведінка, термостійкість, вогнетривкість, ударна міцність, водо- та атмосферостійкість, хімічна стійкість трансверсальні (поперек волокон) механічні властивості композитів вирішальним чином визначаються полімерною матрицею та властивостями межі поділу фаз [15].

Крім того, при розробці в'язучих необхідно враховувати їх технологічні властивості (час, кінетика затвердіння, в'язкість і тиск переробки, змочування армувального матеріалу, усадка тощо), часто ці властивості можуть виявитися вирішальними. Має значення й екологічна досконалість процесів отримання та переробки препрегів (напівфабрикатів у вигляді просочених в'язучим стрічок і тканин) та виробів з композитів: наявність та токсичність застосовуваних розчинників та інших компонентів. Основні вимоги до матриць наведені у таблиці 1.1 [9].

Таблиця 1.1 – Вимоги до полімерних матриць

Властивість полімеру	Властивість полімерної матриці
Теплостійкість	Висока температура склування
Водо-, атмосферостійкість	Низьке водопоглинання, слабка зміна властивостей при вологопоглинанні
Міцність при розтягу	Оптимальна міцність, висока в'язкість руйнування
Міцність при стисканні уздовж волокон	Висока міцність та жорсткість, висока в'язкість руйнування, оптимальна адгезія
Трансверсальна міцність (поперек волокон)	Висока адгезія, висока міцність, великі подовження
Ударна в'язкість	Висока ударна в'язкість, оптимальна адгезія
Технологічність	Низька в'язкість в'язучого, підвищена життєздатність, нетоксичність, знижена температура полімеризації (переробки)

Створення оптимальних, для конкретних застосувань, полімерних матриць обмежено не так можливостями синтетичної полімерної хімії, скільки необхідністю суворо кількісно формулювати широкий комплекс суперечливих вимог до в'язучого. Наприклад, досягти максимальної міцності композитів і визначити відповідні вимоги до механічних характеристик матриці складно через різноманітність механізмів руйнування ПКМ і пов'язане з необхідністю адекватно описувати процес руйнування та випробовувати зразки в умовах, що відображають реальну роботу матеріалу у виробі.

1.3.1 Температура склування

Значення температури склування полімеру та ПКМ збільшується із частотою механічного навантаження. Значення T_g являє значний інтерес на практиці, оскільки визначає область використання матеріалу. На ПКМ істотно впливають атмосферні чинники (температура, вологість, сонячна радіація, циклічна зміна температури тощо), які, будучи активаторами старіння ПКМ, сприяють розвитку фізико-хімічних процесів у матеріалів, та за час експлуатації виробів можуть суттєво знизити їх показники міцності та витривалості. Зокрема, зниження механічних показників матеріалів, у тому

числі внаслідок пластифікації вологою в'язучого, може досягати 30%, а зниження температури склування – на 25°C. Найбільш гостро проблема зберігання характеристик спостерігається при експлуатації техніки в районах з жорсткими кліматичними умовами (тропічний та морський клімат) [11].

1.3.2 Вплив температури на механічні властивості в'язкопружного матеріалу

Механічна поведінка полімерів та ПКМ, що пов'язана з їх фізико-хімічними властивостями, суттєво змінюється в залежності від температури, особливо в зонах переходу скло-рідина.

Неорієнтований аморфний лінійний полімер демонструє яскраво виражені в'язкопружні властивості. Зазвичай він може бути розташований у чотирьох різних областях динамічної механічної поведінки [11]:

- *склоподібна або кристалічна зона*: при низькій температурі він, як і всі полімери, має властивості скла. Рух макромолекулярних ланок дуже обмежений. Модуль пружності E має максимальне значення на скляній пластині (наприклад, 3 ГПа при 1 Гц) та повільно зменшується з температурою. Полімер є жорстким і, як правило, крихким, тому що високий модуль пружності пов'язаний з низькою пластичністю. Має переважно еластичний характер. Значення коефіцієнту механічних втрат дуже низьке – менш 0,03;
- *зона склування або в'язкопружна зона*: при підвищенні температури з'являються локальні деформації макромолекулярних ланок, розташованих в аморфних доменах, причому основні ланки набувають додатковий ступінь свободи; ланки прямують відносно прикладеного механічного навантаження. Полімер пом'якшується вище T_g . Можна слідкувати за падінням E , отже й жорсткості. Полімер має сильний в'язкопружний характер. Коефіцієнт механічних втрат швидко збільшується з температурою та досягає максимального значення, котре може досягати близько 0,2. Аналогічно модуль втрат набуває своїх максимальних значень;

- *гумоподібна зона*: збільшується молекулярна рухомість. Модуль пружності на гумоподібній пластині слабкий (наприклад, $E \sim 1$ ГПа при 1 Гц). Наявність цього плато пов'язана з утворенням переплетінь (випадкових точок зшивання) між ланками полімерного шарика, котрі діють як мости. Гнучкий полімер демонструє високу каучукоподібну еластичність ентропійного походження. Коефіцієнт механічних втрат складає від 0,1 до 0,3;

- *зона текучого середовища або еластичного потоку*: при подальшому збільшенні температури перехід з твердого стану в рідкий. В цій нестабільній області відбувається падіння модуля втрат та знову зростання коефіцієнту втрат. Ця четверта зона не існує для зшитих полімерів.

1.4 Методи забезпечення та підвищення властивостей ПКМ

Модифікація полімерів шляхом впровадження добавок веде до створення багатофазних систем, що складаються з безперервної полімерної фази, що містить введені добавки. Отримані суміші характеризуються унікальною мікроструктурою, що визначає їх властивості. Головні причини, що спонукають застосовувати модифікаційні добавки, полягають у наступному [16]:

- модифікація чи поліпшення властивостей;
- загальне зниження вартості;
- покращення та контроль умов переробки.

Серед основних типів модифікованих полімерних систем – полімерні композити та суміші полімер-полімер. Полімерні композити є сумішшю полімерів з неорганічними добавками певної геометрії (волокна, луски, кульки та гранули). Таким чином, вони складаються з двох і більше компонентів та двох або більше фаз. Добавки можуть бути безперервними, наприклад, довгі волокна або стрічки; такі добавки вводяться в полімер з регулярним геометричним розташуванням і вони поширюються по всьому розміру виробу. Прикладом є поширені термореактивні ламінати на волокнистій основі, які

зазвичай класифікуються як полімерні високоякісні композити. З іншого боку, модифікаційні добавки можуть бути не безперервними (короткими), як, наприклад, короткі волокна, лусочки, пластинки кульки або частинки без певної форми; вони вводяться у безперервні матриці [16].

Модифікаційні добавки для полімерних композитів класифікуються по-різному: підсилювальні елементи, наповнювачі або армувальні наповнювачі. Підсилювальні елементи, які є значно жорсткішими та міцнішими за полімер, зазвичай підвищують модуль пружності та границю міцності. Таким чином, модифікацію механічних властивостей можна розглядати як їх первинну функцію, хоча їх присутність може істотно вплинути на теплове розширення, термічну стійкість та стабільність тощо. У композитах, що містять безперервні підсилювальні елементи, головним чином, термореактивних матрицях, довгі волокна або стрічки, що вкладені у певному геометричному порядку, можуть стати головними компонентами композиту (в орієнтованих композитах вони можуть становити до 70% за обсягом). У не безперервних композитах спрямовані підсилювальні елементи (короткі волокна або лусочки) розташовані в композиті в різній орієнтації та в різному геометричному порядку, що диктується обраними методами переробки та формування; найчастіше це екструзія чи лиття під тиском. І тут вміст добавок зазвичай перевищує 30...40% за обсягом. Слід зазначити, що існують промислові способи приготування термопластичних композитів з безперервними орієнтованими волокнами, що дозволяють отримати більш високий вміст волокна для використання в багатофункціональних інженеріях пластиках [17].

В цілому, параметри, що впливають на властивості полімерних композитів, як безперервних, та і не безперервних, включають:

- властивості модифікаційних добавок (власні властивості, розмір, форма);
- склад;

- взаємодія компонентів на фазових межах, яка також пов'язана з існуванням роздільного шару, що зветься «межею поділу». Вона часто розглядається як окрема фаза, яка керує адгезією між компонентами;
- спосіб виробництва.

Що стосується способів виробництва, всі процеси, що застосовуються для переробки ненаповнених, не модифікованих термопластів, можуть бути використані для переробки не безперервних систем (за винятком формування спінених гранульованих полімерів). Окрім термічного формування, для великих структурних виробів застосовується гаряче штампування посиленних термопластичних листів, що найчастіше містять статично орієнтовані безперервні чи не безперервні волокна. Також наповнювачі використовують в термореактивних процесах, часто при посиленні вихідними волокнами. Концентрація та власні властивості добавки, а також її взаємодія з матрицею є важливими параметрами, що контролюють оброблюваність композиту [16].

1.4.1 Міцність та механізми руйнування ПКМ

Розглянемо вимоги до полімерної матриці і насамперед до граничного шару полімер-волокно з точки зору максимальної реалізації міцності волокон. Міцність композиту істотно залежить від його, структури, напруженого стану та безпосередньо пов'язана з механізмами руйнування матеріалу, які дуже різноманітні. Знання механізму руйнування необхідне для проведення розрахунків та прогнозування властивостей ПКМ, правильного вибору геометрії зразків та методик випробування [13].

При осьовому розтягуванні уздовж волокна реалізуються такі основні механізми руйнування [13]:

- вичерпання несучої здатності волокон у результаті накопичення їх розривів;

- зростання поперечної магістральної тріщини за рахунок послідовного розриву волокон на початку тріщини внаслідок збільшення концентрації напружень;

- розшарування уздовж волокон по матриці, межі поділу або по самому волокну в залежності від співвідношення їх властивостей.

Конкуренція двох перших механізмів руйнування проявляється в тому, що, наприклад, збільшення міцності та жорсткості матриці призводить до зменшення критичної (неефективної) довжини волокна l , таким чином, збільшення міцності композиту, тобто, у разі переважає перший механізм. Однак при цьому збільшується концентрація напруги на початку тріщини (у сусідніх з розірваними волокнами), що призводить до передчасного руйнування композиту по другому механізму [13].

Виявлено екстремальну залежність міцності композитів від температури, швидкості випробування та концентрації добавок у в'язучому. Все це – наслідок конкуренції механізмів руйнування композитів та температурно-часової залежності межі плинності полімерної матриці. Таким чином, матриця має бути оптимально пружною та міцною. Величина оптимуму залежить від природи та властивостей армувальних волокон, наявності у матеріалі виробу геометричних та технологічних концентраторів напруг [13].

Третій механізм руйнування (повздовжнє розшарування) відбувається внаслідок порівняно повільного поширення тріщин уздовж волокон, яке пов'язане з впливом зсувних або трансверсальних напруг у місцях порушення співвісності волокон або внаслідок відмінності коефіцієнтів теплового розширення, Пуассона та ін [13].

При стисканні уздовж напрямку армування також спостерігається кілька механізмів руйнування [13]:

- різні форми втрати стійкості волокон;
- повздовжнє розшарування з наступною втратою стійкості елементів композиту;

- утворення смуг скидання, розташованих під невеликим кутом до осі матеріалу, що призводить до його плинності або ламкого руйнування.

Реалізація першого механізму спостерігається у склопластиках на основі товстих волокон або у зразках з ідеальною структурою, випробуваних у спеціальних умовах. Міцність таких композитів підвищується зі збільшенням ступеня наповнення та модуля пружності в'язучого. Як правило, склопластик руйнується шляхом розшарування, що виникає, як і у разі розтягування, за наявності дефектів у структуру матеріалу. Спостерігається пряма залежність між показниками міцності при стисканні та зсуві [13].

Третій механізм руйнування характерний для ПКМ з анізотропними органічними або вуглецевими волокнами, міцність яких на стиснення значно нижча, ніж при розтягуванні. І тут міцність композиту підпорядковується правилу адитивності [13].

Основні фізико-механічні властивості полімерних матриць можна розділити на три взаємно протилежні групи, які дуже важко узгодити. До однієї групи можна віднести міцність, жорсткість, теплостійкість полімерної матриці, до іншої – пластичність, в'язкість руйнування, тріщиностійкість, ударну в'язкість; до третьої – перероблювання, технологічність в'язучого. При модифікації, зміні умов, хімічної структури, ступеня хімічної зшивки та іншого, прагнучи покращити та покращуючи властивості однієї групи, автоматично погіршуємо інші. При конструюванні композиційного матеріалу завдання полягає в тому, щоб знайти компроміс, оптимізувати вибір в'язучого, враховуючи ще й екологічні, економічні, кон'юнктурні та інші міркування [9].

1.4.2 Вплив армувальних наповнювачів на властивості ПКМ

Традиційно наповнювачі розглядалися як модифікуючі добавки, які, зважаючи на їх несприятливу форму, площу поверхні або хімічного складу поверхні, можуть лише невеликою мірою збільшувати модуль пружності полімеру, тоді як міцність (на розтяг, на згин) залишається незмінною або

навіть зменшується. Їхня основна перевага полягає у зниженні вартості матеріалів за рахунок заміщення більш вартісного полімеру; інший потенційний економічний вигаш пов'язаний із прискоренням циклів формування внаслідок збільшеної теплопровідності та зниженням браку та деформації. Залежно від типу наповнювача можуть торкатися й інші властивості полімерів, наприклад, при введенні волоконних матеріалів може істотно зростати в'язкість розплаву. З іншого боку, усадка під час лиття під тиском і теплове розширення повинні зменшуватися при використанні більшості неорганічних наповнювачів [3, 18].

Термін «підсилювальний наповнювач» був введений для опису не безперервних добавок, форма, геометрія та/або поверхневий хімічний склад яких був модифікований з метою поліпшення механічних властивостей полімеру, зокрема, міцності. Неорганічні підсилювальні наповнювачі жорсткіші за матрицю та деформуються менше її, що призводить до загального зменшення деформації матриці, особливо поблизу частинки через наявність межі частинка-матриця. Волокно приєднує полімер біля себе, знижуючи деформацію та підвищуючи жорсткість. Для підсилювачів наповнювачів характерно відносно низьке аспектне відношення α , визначене як відношення довжини волокна до його діаметра або як відношення діаметра до товщини пластинок чи лусочок. Для кульок, які дають мінімальний посилюючий ефект, аспектне відношення дорівнює одиниці. Корисним параметром для оцінки ефективності наповнювача є відношення площі його поверхні F , до об'єму V , яке для досягнення належного посилення має бути максимально високим. Досягнення максимального відношення F/V та взаємодії частинка-матриця через межу вимагає $\alpha \gg 1$ для волокон та $1/\alpha \ll 1$ для пластинок [3, 18].

При створенні підсилювальних наповнювачів метою цього процесу або модифікації матеріалу є збільшення аспектного відношення частинок, покращення їх сумісності та граничної адгезії з хімічно неспорідненою полімерною матрицею. Такі модифікації можуть посилювати та оптимізувати як первинну функцію наповнювача, що використовують як модифікатор

механічних властивостей, але й забезпечити чи посилити додаткові функції. Нові функції, які досягаються заміщенням або модифікацією існуючих наповнювачів, розширюють діапазон їх застосування [3, 18].

1.4.3 Функціональні наповнювачі

Термін «наповнювач» є дуже широким і включає дуже великий діапазон матеріалів. Тут наповнювачі довільно визначені як різноманітні тверді дисперсні матеріали (неорганічні та органічні), які можуть ати нерегулярну форму, бути голчастими, волокноподібними або пластинчатими, які вводяться в розумно великих обсягах в полімери [19].

Є значне розмаїття хімічної будови, форм, розмірів та власних властивостей різних неорганічних та органічних сполук, що використовуються як наповнювачі. Це зазвичай тверді матеріали, взаємно не розчинні в матриці як у розплаві, так і твердому стані і, у такому вигляді, що утворюють певні дисперсні структури. Їхньою відмінністю є те, що вони застосовуються у відносно високих концентраціях ($> 5\%$ за обсягом), хоча деякі поверхневі модифікатори та технологічні добавки використовуються в низьких концентраціях. Наповнювачі можна класифікувати як неорганічні та органічні субстанції, з подальшим поділом за хімічними класами або за їх формою та розміром чи аспектним відношенням. Найчастіше використовуваними порошкоподібними наповнювачами є промислові мінерали, такі як тальк, карбонат кальцію, слюда, каолін, польовий шпат і барит [19].

Більш зручна схема полягає в класифікації наповнювачів відповідно до їх специфічної функції, наприклад, здатність модифікувати механічні, електричні або термічні властивості, вогнетривкість, характеристики переробки, проникність розчинників або просто вартість приготування композиції. Наповнювачі, однак, є багатофункціональними, і вони можуть характеризуватись первинною функцією та рядом додаткових функцій [19].

1.5 Основні переваги та недоліки ПКМ

Досить часто при формуванні конструкцій з ПКМ одночасно створюється й готовий виріб. У кожному окремому випадку це може бути як перевагою, так і недоліком.

Композиційні матеріали завжди створюється для реалізації конкретних завдань, отже він не може вмістити в себе всі можливі переваги. Тобто при проектуванні композиційного матеріалу розробник може надати йому певні характеристики, які значною мірою перевищуватимуть за аналогічними параметрами традиційні матеріали, але водночас поступатимуться іншим. Це означає, що не можна створити якийсь один універсальний матеріал, тому розробник повинен заздалегідь знати, в яких умовах експлуатуватиметься його виріб, виконати всі необхідні підрахунки та лише за потім обрати оптимальний склад [9].

Основні переваги, які можна забезпечити використанням композиційних матеріалів [11]:

- досить висока міцність;
- значна жорсткість;
- мала питома вага;
- опір «старінню матеріалу»;
- значно менша схильність до зносу.

Композиційні матеріали мають також і ряд недоліків:

- анізотропія – одні й ті самі властивості можуть у десятки разів різнитися залежно від напрямку зовнішнього впливу (вздовж чи поперек волокон);
- великий питомий об'єм;
- гігроскопічність, оскільки ПКМ неоднорідні вони мають властивість вбирати вологу;
- токсичність – при виготовленні та експлуатації дані матеріали здатні виділяти шкідливі для здоров'я людини речовини;

- висока вартість, яка пов'язана з коштовним устаткуванням, що використовується при виробництві композиційних матеріалів.

Зазначимо головні переваги та недоліки термореактивних в'язучих загалом. До переваг слід віднести [11]:

- задовільні технологічні властивості: низька в'язкість в'язучого, здатність до швидкого змочування та просочування армувального матеріалу, порівняно низькі температури склування;

- високий ступінь адгезії до більшості волокон;
- підвищена теплостійкість;
- стійкість у різних середовищах: хімічна, водо- та атмосферостійкість, низька проникність для рідин та газів;

- властивості можна регулювати в широкому діапазоні шляхом варіювання компонентів, додавання модифікаторів, каталізаторів та зміни умов полімеризації.

Недоліки [11]:

- крихкість, низькі в'язкість руйнування та ударна міцність;
- неможливість вторинної переробки;
- тривалий час полімеризації через необхідність проведення екзотермічної хімічної реакції у м'якому режимі (без значних перегрівів);
- обмежений час життєздатності препрега;
- значна хімічна усадка;

Типові властивості термореактивних полімерних матриць наведені в таблиці 1.2 [11].

Таблиця 1.2 – Типові властивості термореактивних полімерних матриць

Властивість	Поліефіри	Епоксидні	Феноло-формальдегідні	Поліамідні
Густина, кг/м ³	1240...1440	1110...1390	1380...1940	1400
Границя міцності, МПа	55...96	28...90	34...48	83...207
Модуль пружності, ГПа	2,1	0,69...3,45	6,9...9,7	3,45...4,14
Гранична деформація, %	5...300	3...50	—	2...12
Міцність при ударі, Дж/см	2,72	1,09...5,44	1,63...199	13,6
Теплопровідність Вт/(м·К)	2,1...1,7	0,10...0,25	0,17...0,22	2,2
Температура пом'якшення, °С	50...60	40...260	130...195	260...320
Адсорбція води за 24 год., %	0,08...0,09	0,08...0,15	0,30...0,60	0,30...0,50

1.6 Визначення мети та задач дослідження

Головною метою дипломної роботи є – дослідження механічних та фізичних властивостей конструкцій з ПКМ, розробка та вдосконалення технології виготовлення зразків для дослідження цих властивостей, на основі матеріалів, що використовуються при формуванні готової деталі, яка є силовим елементом всієї конструкції. Задачею роботи є – випробовування отриманих зразків на високоякісному обладнанні, виготовлених за запропонованою технологією, аналіз результатів випробувань та порівняння їх з технологією використовуваною у виробництві.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір і обґрунтування методів випробувань

2.1.1 Загальні вказівки

Для визначення механічних і фізичних властивостей зразків, – а саме: модуля пружності та температури склування, що насамперед дають змогу визначити доречність технології виготовлення багатошарової конструкції з ПКМ, – розглядаємо методику визначення температури склування та модуля пружності конструкцій, що містять високомодульні волокна, з модулем більше 20 ГПа, методом динамічного механічного аналізу, що спирається на ASTM D7028 [20].

2.1.2 Сутність методу ДМА

Зразок у формі прямокутної смужки поміщають до приладу ДМА та піддають його коливанням із мінімальною частотою 1 Гц та нагріву зі швидкістю 4...6°C/хв. З метою збереження можливості зіставлення результатів для зразків з різною вологістю використовують однакову частоту навантажень та швидкість нагріву. Температуру склування T_g ДМА визначають як температуру, при якій спостерігають значне падіння модуля пружності E . У цілях порівняння визначають пікову температуру графіку тангенса кута механічних втрат T_δ , а також T_g ДМА [13].

2.1.3 Підготовка зрізків до випробувань

Для визначення температури склування використовують два зразки. Розмір зразка повинен відповідати вимогам з експлуатації приладу.

Рекомендоване відношення довжини до товщини зразка – більше десяти. Точний розмір зразка згідно інструкції приладу TA Instruments DMA Q800, як правило, відповідає діапазону від $(56\pm4)\times(12\pm1)\times(2,0\pm0,5)$ мм до $(22\pm1)\times(3\pm1)\times(1,0\pm0,5)$ мм (припуск на затиск). Кінцеві розміри зразка уточнюються після проведення випробувань [20, 21].

Одне з основних напрямків армування повинно бути спрямовано за повздовжньою віссю зразка. Не допускається застосовувати зразки у яких армування не співпадає з повздовжньою віссю. Будь-які відхилення від базового напрямку армування відображають в протоколі випробувань [20, 21].

Поверхні зразків повинні бути рівними, чистими та сухими для запобігання проковзування в затисках і зниження впливів, що обумовленні вологою. Товщина та ширина зразка уздовж його довжини не повинні відрізнятися більше ніж на 2% [20, 21].

За наявності видимих дефектів у зразка його відбраковують.

Проводять калібрування використовуваної апаратури згідно інструкцій виробника. Обладнання калібрують за режимами навантажень, за якими будуть проводити випробування (вигин консольної балки чи триточковий вигин). Очікуване значення температури склування T_g ДМА повинно знаходитись у діапазоні, що охоплюють точки калібрування [20, 21].

На результат випробувань значно впливає вологість. Для того, щоб кількісно визначити зміну вмісту води в зразку зважують зразок до та після проведення випробувань. В залежності від вологості зразка, яка вказана у нормативному документі або технічній документації на матеріал, зразки кондиціонують [20, 21].

Після затвердіння матеріал зберігають у ексікаторі або у герметично закритому пакеті для зберігання зразків за виключенням часу, необхідного для підготовки зразка та проведення випробувань. Максимальний час між затвердінням та проведенням випробувань – 30 днів, після чого перед проведенням випробувань зразки кондиціонують [20, 21].

Перед сушкою в печі необхідно зважити зразок з необхідною точністю та зафіксувати результат у якості початкової маси зразка W_b . Розмістити зразок у печі, що нагріта до температури 70°C (для зразків, що твердіють при температурі 125°C) та витримати 24 години. Після чого зважити масу в даний момент часу W_i . Повторити процес та визначити рівноважний стан вологості за формулою [20, 21]:

$$\left(\frac{W_i - W_b}{W_b} - \frac{W_{i-1} - W_b}{W_b} \right) \cdot 100 < 0,020\%, \quad (2.1)$$

де W_i – маса зразка в даний момент часу, г;

W_b – початкова маса зразка, г;

W_{i-1} – значення маси зразка у попередній момент часу, г.

Матеріал досяг дійсного рівноважного стану вологості, якщо зміна середнього вмісту води за кожний з двох послідовних періодів складає менше ніж 0,02 %. Після кондиціювання зразки зберігають в ексікаторі або в герметично закритому пакеті для зберігання зразків [20, 21].

2.2 Матеріали та обладнання

У ході роботи для виготовлення зразків на механічні випробування та формування конструкції з ПКМ використовували препреги чеського виробника – компанії «DISTAR». Це однонаправлені препреги G255 зі скляної тканини, що просочені епоксидним в'язучим, з поверхневою густиною – 248 г/м^2 ; однонаправлені препреги C200 з вуглецевої тканини, що просочені епоксидним в'язучим, густиною – 195 г/м^2 ; препреги C150 з перпендикулярно переплетеною основою у напрямках $0/90^{\circ}$ та $\pm 45^{\circ}$, що просочені епоксидним в'язучим, з поверхневою густиною – 148 г/м^2 .

Для вимірювання в'язкопружних властивостей зразків з ПКМ використовували прилад TA Instruments DMA Q800, що аналізує механічний вплив на досліджуваний зразок. Аналізатор ДМА – найчутливіший прилад для визначення температури склування T_g . Значення T_g визначається шляхом

будування частотної кривої. Температура при якій значення коефіцієнту втрат є максимальним – називається температурою склування.

2.3 Динамічний механічний аналіз

Механічний динамічний аналіз представляє собою метод вимірювання в'язкопружних властивостей. Цей метод термічного аналізу дозволяє вивчати та характеризувати механічні та фізичні властивості в'язкопружних матеріалів, таких як полімери (композити).

ДМА інструмент дозволяє визначати наступні внутрішні фізичні величини:

- комплекс модулів Юнга та комплексну в'язкість;
- демпфування – коефіцієнт втрат ($\tan \delta$);
- температуру склування (T_g), що залежить від частоти коливального приладу. ДМА більш чутливий, ніж інші методи термічного аналізу для визначення T_g та виявлення переходів у композитах.

У ДМА зразок піддають коливальному (синусоїдальному) навантаженню або деформації. Експерименти по в'язкопружності проводяться в області лінійної поведінки. В динамічних умовах механічні властивості матеріалу залежать від деформації, частоти збудження та температури – цими параметрами керує прилад ДМА.

Тип прикладення навантажень, таких як стискання, зсув або вигин, залежить від обраного затискача, матеріалу зразка та його розмірів. Збірка розміщується у камері з регульованою температурою. Використовується відповідне програмне забезпечення для розрахунку отриманих даних.

На відміну від металів і жорстких конструкційних матеріалів, термопластичні полімери та ПКМ демонструють модулі пружності та коефіцієнти втрат, котрі значно змінюються в залежності від температури та частоти. Більш того, ці динамічні властивості багато в чому залежать від їх складу, напрямку армування, технології виготовлення та виробничого процесу.

Таким чином, прилад ДМА дозволяє точно охарактеризувати зразок в'язкопружного матеріалу. Він представляє собою інструмент оцінки, що задовільно підходить для ПКМ та усіх методів термічного аналізу.

2.3.1 Обладнання для ДМА

Динамічний механічний аналізатор TA Instruments DMA Q800 [22] (рис.2.1) у даний час є найбільш популярним приладом для ДМА у світі. Причина такого успіху – унікальна конструкція приладу (рис.2.2), що включає високоточний контроль навантаження з використанням безконтактного лінійного двигуна, підтримку вала навантажувального елемента повітряними підшипниками (що практично виключають тертя) і вимірювання зміщення оптичним датчиком з високою роздільною здатністю. Завдяки такій конструкції прилад легко перевершує багато аналізаторів інших виробників за технічними характеристиками та якістю аналітичних даних. Таке поєднання елементів дозволяє зменшити тертя, що виникає в приладі, до надзвичайно малих величин і працювати з речовинами при дуже малих навантаженнях, у великому діапазоні лінійного переміщення (до 10000 мкм), яке визначається оптичним елементом з роздільною здатністю 1 нм [22].



Рисунок 2.1 – Динамічний механічний аналізатор TA Instruments DMA Q800:

1 – камера нагріву та затиску зразків; 2 – канал контролю вологості та регулювання температурного режиму камери; 3 – система контролю вологості.

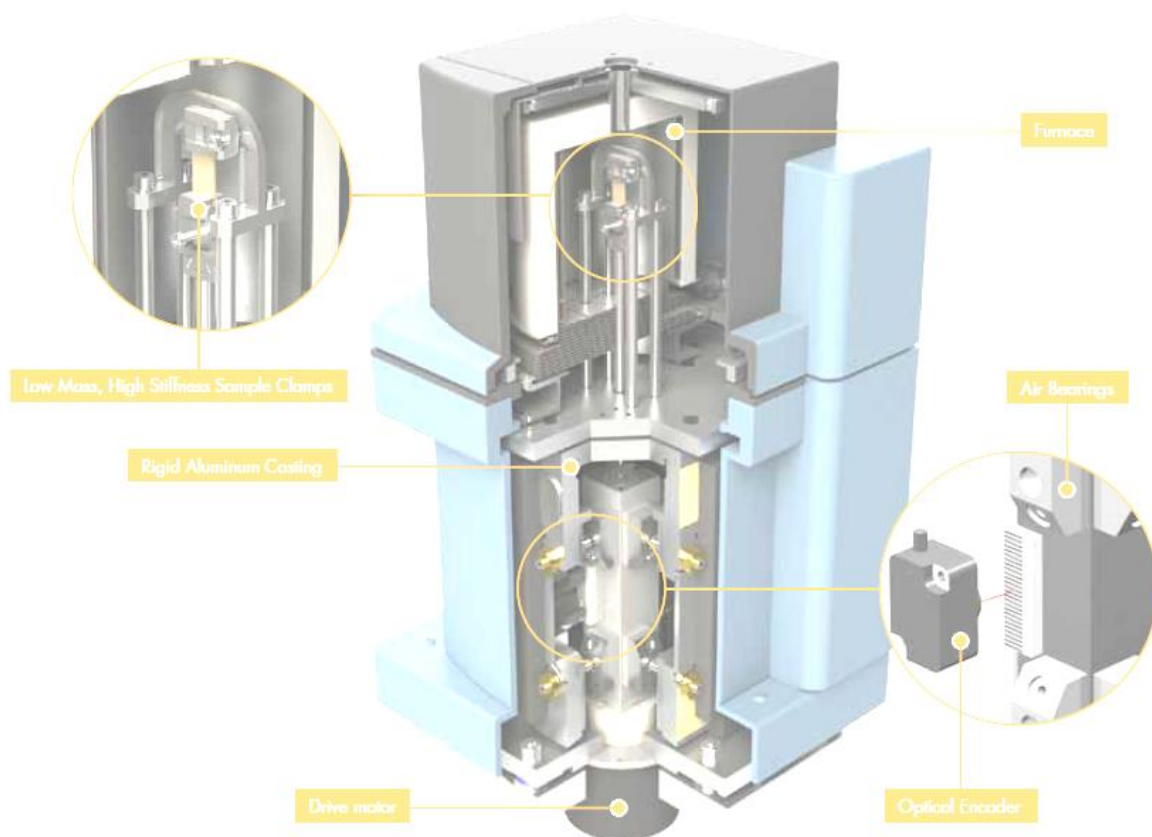


Рисунок 2.2 – Виконавчі механізми приладу DMA Q800

DMA Q800 являє собою дослідницький прилад здатний працювати, як динамічний механічний та термомеханічний аналізатор, у різних режимах деформації (стиснення, розтягування, вигин по двох або трьох точках, пенетрація, зсув, стиск та розтягування у рідині) та з використанням різних газових середовищ, температур та режимів навантаження [22].

Простий, але потужний інтерфейс програмування методики аналізу дозволяє постійно набирати будь-які найскладніші температурні програми (нагрів, витримка, охолодження) у поєднанні з різними варіантами навантаження (динамічний, багаточастотний, одночастотний, статичний) з можливістю редагування методу аналізу в процесі його виконання. Великий вибір затискачів (рис.2.3) з різних матеріалів дозволяє працювати з твердими зразками різної форми, волокнами, плівками, а також рідкими, порошкоподібними речовинами і матеріалами, що поєднують кілька фаз в процесі їх затвердіння або розм'якшення [22].

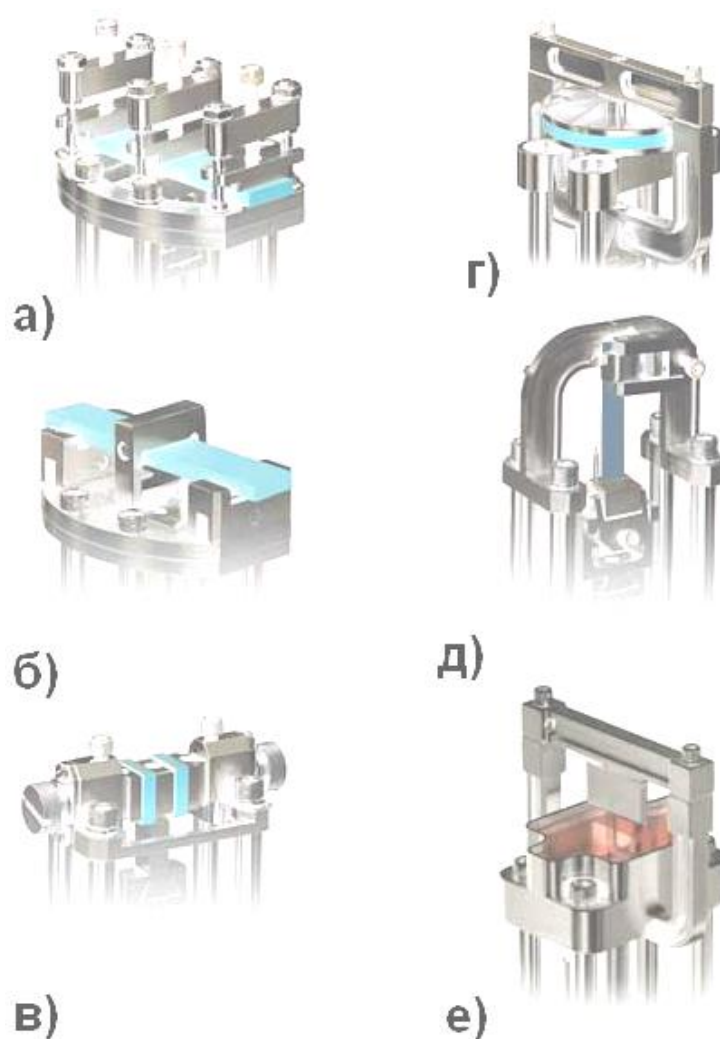


Рисунок 2.3 – Варіанти затискачів для різних методів випробувань зразків:

а – подвійний/одинарний затиск; *б* – вигин за трьома точками; *в* – зсув;
г – стискання; *д* – розтягування ; *е* – затиски для занурення зразків у рідину.

Прилад ДМА включає наступні додаткові системи [22]:

- Система охолодження рідким азотом розширює діапазон температур приладу до -150°C . Система використовує холодний газоподібний азот, що виходить при випаровуванні рідкого азоту з 50 літрового резервуару при контрольованому нагріванні. Функція автоматичного заповнення резервуару може бути запрограмована так, щоб автоматично заповнювати систему між експериментами або під час експерименту. Остання можливість

зручна у разі довгих за часом експериментів, які зазвичай проводяться при отриманні даних для перетворення час/температура.

- *Система контролю вологості* дозволяє вивчати механічні властивості зразка при контрольованих та/або змінній відносній вологості та температурі. Система спеціально розроблена для приладу DMA Q800. Вона являє собою повністю інтегрований модуль, що дозволяє працювати в широкому діапазоні температур (5...120°C) та вологості (5...95% відносної вологості), змінюючи або фіксуючи ці параметри в залежності від завдання аналізу.

Прилад ДМА включає наступні режими деформації [22]:

- У *багаточастотному режимі* можна вивчати в'язкопластичні властивості матеріалу як функцію частоти деформації за постійної амплітуди. Ці тести можна проводити залежно від частоти, часу, температури (при розгортанні за температурою або при покроковій зміні температури).

- У *режимі повзучості* навантаження підтримується постійним, а деформація вимірюється як функція часу. У режимі релаксації напружень постійною підтримується деформація, а вимірюють залежність навантаження від часу.

- У *режимі постійної деформації* приладу деформація підтримується постійною в процесі зміни температури. Такий режим можна використовувати для вимірювання усадочних напружень, що виникають у волокнах або плівках.

Прилад ДМА забезпечує наступні варіанти затисків (рис.2.4) [22]:

- *Вигин за трьома точками.* У цьому режимі зразок підтримується з двох сторін, а згинальне навантаження прикладається посередині. Цей режим вважається «чистою» деформацією тому, що немає ефектів, що виникають за рахунок фіксації затискачами зразка. Затискачі для зменшення тертя використовують спеціальні роликові підтримуючі платформи, що збільшують точність аналізу.

- *Подвійний/одинарний затиск.* У цьому режимі зразок затискається з обох боків і піддається деформації вигину посередині (подвійний) або за край

(одинарний). Це багатоцільовий метод вивчення термопластичних матеріалів. Подвійний затискач ідеальний для вивчення затвердіння армованих термореактивних матеріалів.

- *Стискання.* У цьому режимі зразок поміщають на нерухому плоску платформу та прикладають навантаження верхньою плоскою поверхнею. Режим зазвичай застосовують для матеріалів з низьким або середнім модулем пружності. У цьому режимі можна проводити вимірювання розширення або стиснення матеріалу, а також вимірювати прилипання для адгезійних матеріалів.

- *Зсув.* У цьому режимі два шматки одного зразка однакового розміру піддають деформації зсуву між нерухомою та рухомою пластинами. Цей режим ідеальний для вивчення гелів, клеїв, високов'язких смол та інших матеріалів з високим розсіюванням механічної енергії.

- *Затиски для занурення зразків у рідину.* Прилад дозволяє працювати в режимах розтягування та стиснення при зануренні зразка в рідке середовище (у воду). Температурний діапазон таких експериментів обмежений характеристиками рідкої фази.

Розтягування. У даному режимі зразок затискають між нерухомою та рухомим затискачами. В осциляційних режимах прилад дозволяє використовувати різні методи застосування статичного навантаження для запобігання складання або короблення. Є затискачі для волокон та плівок. Технічні характеристики аналізатора DMA Q800 наведені у таблиці 2.1 [22].

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики DMA Q800.

Максимальне зусилля навантаження	18 Н
Мінімальне зусилля навантаження	0,0001 Н
Розширення зусилля навантаження	0,00001 Н
Розширення за деформацією	1 нм
Діапазон вимірювального модуля пружності	$10^3 \dots 10^{12}$ Па
Точність вимірювання модуля пружності	$\pm 1\%$
Чутливість за $\tan \delta$	0,0001
Розширення за $\tan \delta$	0,00001
Діапазон частот	0,01...200 Гц
Діапазон динамічної деформації зразка	0,5...10000 мкм
Діапазон температур	-150...+600°C
Швидкість нагріву	0,1...20°C/хв.
Швидкість охолодження	0,1...10°C/хв.
Стабільність температури	$\pm 0,1^\circ\text{C}$

2.3.2 Основний принцип методу ДМА

Загальний термін ДМА відноситься до приладів з вільною та примусовою вібрацією. В першому випадку зразок коливається; потім після зняття навантаження амплітуда зменшується за рахунок демпфування [23].

Аналізатор прямого доступу використовує тип вимушеної вібрації поза резонансу. Він застосовує коливальне зміщення до зразка матеріалу, що аналізується. Результируюча динамічна сила, що передається зразком, вимірюється [23].

Принципи лінійної в'язкопружності застосовують тільки для дуже низьких рівнів навантажень та деформацій, що зазвичай призводить до зберігання конструкції в стані спокою. За визначенням, матеріал (гомогенний, ізотропний чи аморфний) демонструє лінійну в'язкопружну поведінку або задовольняє принципу суперпозиції Больцмана, якщо деформація виражається як лінійна функція навантаження при заданій температурі та частоті [23].

Резонансний метод (рис.2.4) вимушеної вібрації [23], з використанням синусоїдального сигналу при зсуві чи стисканні, зазвичай є більш переважним для отримання технічних даних. Обладнаний датчиками динамічний аналізатор в'язкопружності в основному вимірює дві динамічні величини: зміщення та

силу. Вимірювання проводяться на лінійних змінах (кінетичний режим) або на сходинках температури (стабілізований режим) [23].

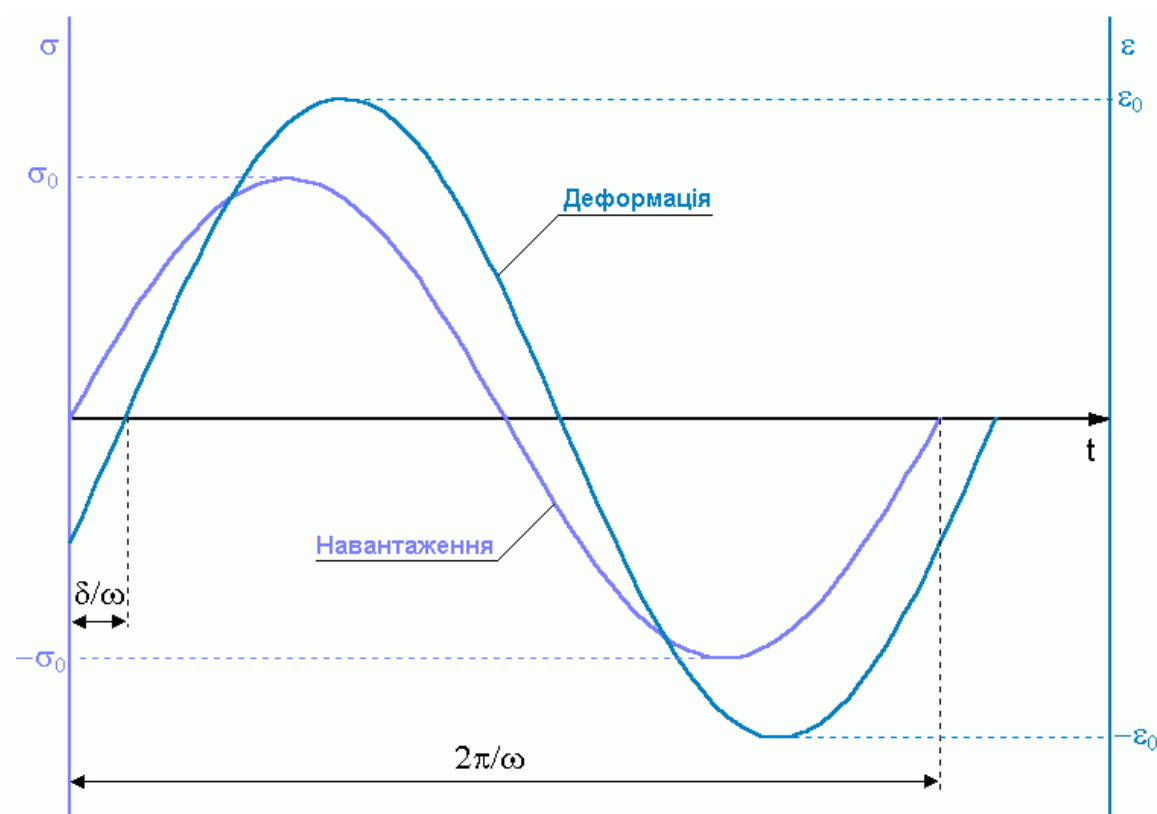


Рисунок 2.4 – Фазовий зсув « δ/ω » між σ – навантаженням та ε – деформацією в'язкопружного матеріалу, що піддали синусоїдальним коливанням: δ – фазовий кут; ω – кутова швидкість (пульсація)

Зсув фаз між синусоїдальним збудженням вхідних та вихідних сигналів задається фазовим кутом δ . Фазовий зсув пов'язаний з в'язкопружними властивостями матеріалу. Кут δ розраховується з обробки цих сигналів згідно зі швидким перетворюванням Фур'є [23].

Під час динамічного механічного вимірювання прикладається синусоїдальне навантаження з частотою f . Сигнал навантаження можна записати як [23]:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t), \quad (1.1)$$

де σ_0 – амплітуда стресового циклу;

$\omega = 2\pi f$ – пульсація, рад/с;

t – час, с.

Сигнал деформації в'язкопружного матеріалу знаходиться у протифазі (тому що матеріал розсіює частину енергії за рахунок деформації ε), а саме [23]:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (1.2)$$

де ε_0 – амплітуда циклу деформації.

Коефіцієнт механічних втрат дорівнює тангенсу кута δ . Температура склування T_g визначається зі значень коефіцієнта механічних втрат. Знаючи геометрію зразка, динамічну жорсткість і фазовий кут, можна обчислити деякі властивості в'язкопружних матеріалів, наприклад, модуль пружності.

2.3.3 Види впливу на зразки при ДМА

Види деформації обумовлені геометрією затисків зразків (рис.2.5). Вибір типу деформації залежить, зокрема, від природи (тверде тіло, паста чи рідина) та від стану (склоподібний, каучукоподібний, твердіння, зрідження, плавлення та інші) матеріалу. В глобальному масштабі експериментатору можуть надати три випадки, в залежності від значення модуля [13]:

- матеріали верхньої частини модуля Юнга ($E > \sim 10$ ГПа), оскільки деякі композиційні матеріали або кераміку аналізують при розтягу-стиску або вигині;
 - тверді матеріали з нижчим модулем пружності можуть характеризуватися розтягуванням-стиском або зсувом;
 - пастоподібні матеріали зазвичай аналізуються на зсув;
- рідини (мастила, фарби, клеї, лаки та інші) випробовують тільки на зсув. Затискач зразка складається з поршня, зануреного в чашу, що містить зразок. Поршень збуджує в'язкопружну рідину кільцевим насосним рухом.

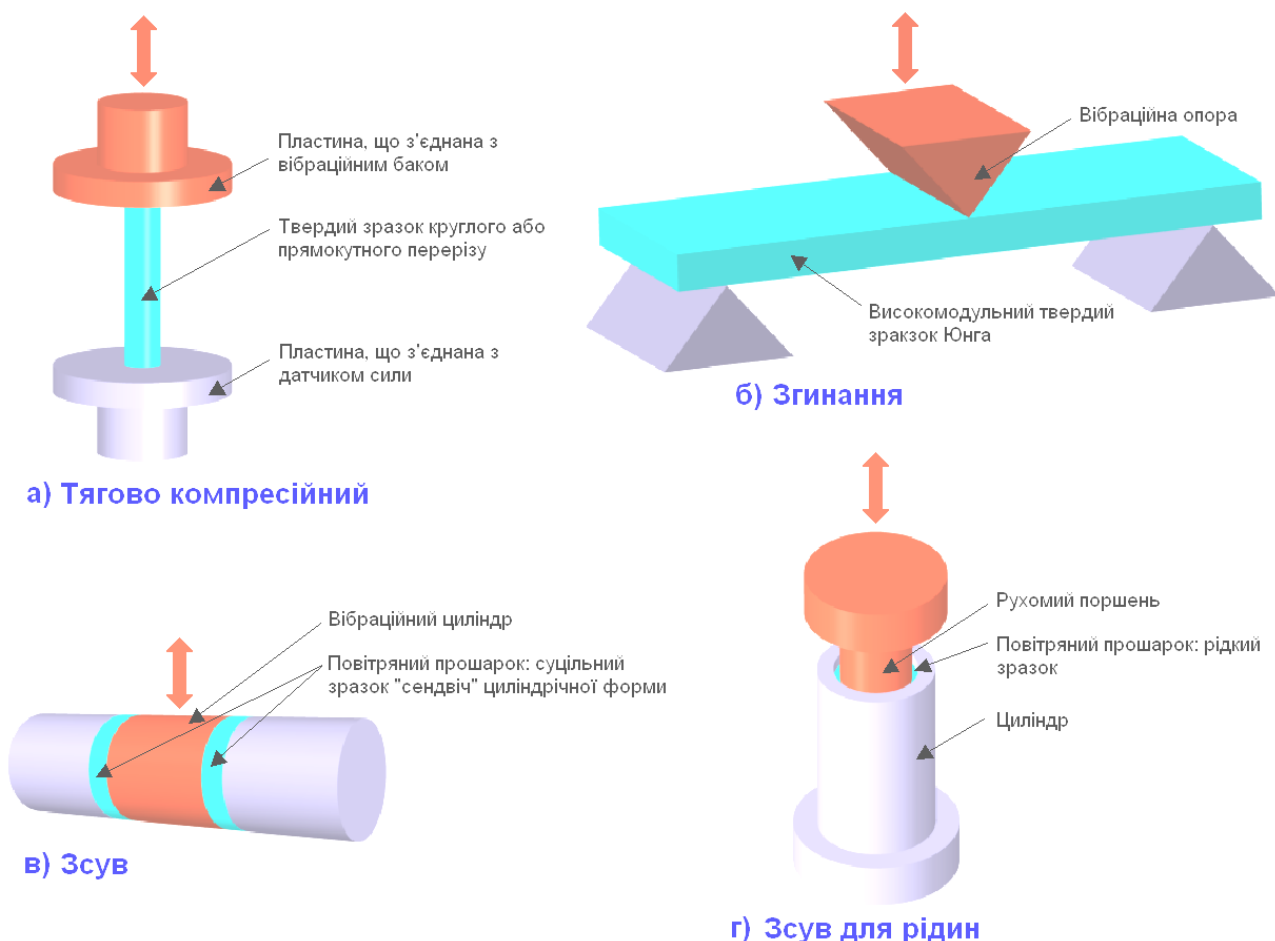


Рисунок 2.5 – Типи деформації та приклади схематичних геометрій:
 а – тягове стискання з паралельними пластинами, б – триточковий вигин з опорами, в – плоский зсув з подвійним повітряним прошарком г – кільцеве накачування [13].

2.4 Вимоги до безпеки та охорони навколишнього середовища

При проведенні випробувань зразків з ПКМ можуть виникнути наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори [21]:

- вражаюча дія електричного струму;
- вплив рухомих елементів випробувального обладнання;
- підвищений вміст скла та вуглецевого пилу в повітрі. Гранично допустима концентрація не повинна перевищувати для скляного пилу 2 мг/м^3 , вуглецевого – 4 мг/м^3 .

При проведенні випробувань суворо дотримуватися вимог інструкцій з протипожежної безпеки, виробничої санітарії, техніці безпеки та охорони праці, що діють на даному робочому місці.

3 РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ І ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЙ З ПКМ

3.1 Технологія виготовлення досліджуваної деталі

Дослідження механічних і фізичних властивостей проводились для забезпечення міцності та технологічності деталі «Лонжерон у зборі» (рис.3.1). Лонжерон – це силова частина лопаті рульового гвинта вертольота, яка забезпечує несучу здатність основного профілю лопати. Складається лонжерон з таких основних частин: обшивка лонжерона (поз. 4), та сердечники (поз.1, 2, 3).

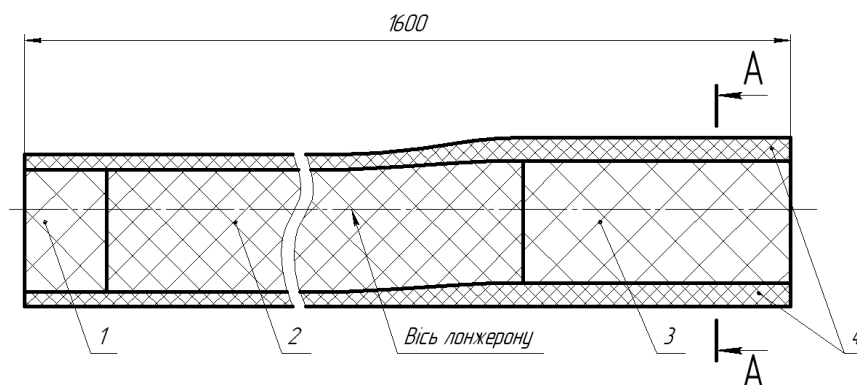


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд деталі «Лонжерон у зборі» в повздовжньому перерізі: 1 – «Заглушка у зборі», 2 – «Сердечник лонжерона», 3 – «Сердечник комлевий», 4 – «Обшивка лонжерона». Переріз А-А див. рис.3.2

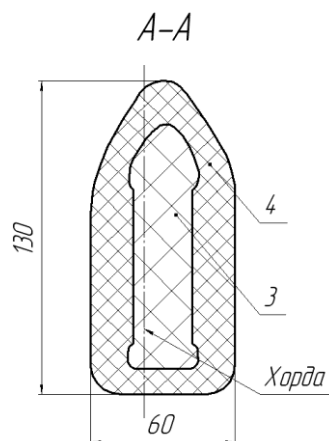


Рисунок 3.2 – Переріз А-А (див. рис.3.1): 3 – «Сердечник комлевий», 4 – «Обшивка лонжерона»

Заглушка поз.1 та комлевий сердечник поз.3 сформовані заздалегідь з матеріалу LYTEX – рублених хаотично розташованих скляних волокон, що просочені епоксидним в'язучим. Формування виконується у алюмінієвих матрицях, які повністю повторюють профіль кінцевої деталі. Режим полімеризації – $125\pm 5^{\circ}\text{C}$ при 180 ± 10 хвилин (3 години). Сердечник лонжерона поз.2 виготовлений з конструкційного пінопласту RHACELL густиною 75 кг/м^3 методом обробки різанням на станку з ЧПК.

Перед збіркою лонжерона сердечник з пінопласту просушують у печі при температурі 70°C з часом витримки 180 ± 10 хвилин (3 години), щоб випарувати вологу, яку вбирає в себе пористий матеріал. Ця операція призначена для виключання потрапляння вологи у збірну одиницю, адже вода, яка з'являється в деталі з повітря, при нагріванні буде випаровуватися та утворювати порожнини у загальній збірці.

На початку збирання лонжерону деталі поз. 1, 2 та 3 з'єднують між собою на клейку плівку, яка полімеризується разом з усіма деталями. Після з'єднання деталей на стелажі, зверху на утворений профіль викладають заздалегідь зібрані пакети препрегів, які шар за шаром між собою утворюють кінцевий профіль – «Обшивку лонжерона».

Збірки препрегів складаються з 8...14 шарів в кожному пакеті. Найбільший перетин, а отже і найбільшу кількість шарів, близько 150 на кожную сторону (стінку) лонжерона, містить комлева частина лонжерона (див. рис.3.2). Після збирання безлічі шарів обшивки, лонжерон розміщують у нижню частину матриці (прес-форми). Після декількох підпресувань за допомогою верхньої частини прес-форми, – це потрібно для того, щоб вийшов весь зайвий матеріал та повітря, адже при ручному викладанні просторової деталі складного профілю утворюються незаповнені внутрішні місця, – зрізується сформований на краях лонжерону буртик зайвого матеріалу, змикають дві частини матриці, та стягують шпильками. Витримують 30 хвилин, знімають шпильки та встановлюють матрицю у гідравлічний прес Beckwood з індукційним підігрівом. До прес-форми приєднують термопари з пресу для контролю

температури нагріву, а також термопари, що приєднані до самописця, для фіксування режиму полімеризації. Прес-форму нагрівають до температури $125 \pm 5^\circ\text{C}$ зі швидкістю $1 \dots 2^\circ\text{C}/\text{хв}$; витримують при температурі $125 \pm 5^\circ\text{C}$ та навантаженні на прес-форму у 50 тонн протягом 180 ± 10 хвилин; охолоджують під навантаженням до $30 \dots 40^\circ\text{C}$ зі швидкістю $1 \dots 2^\circ\text{C}/\text{хв}$.

3.2 Технологія підготування та обробки зразків

На даний час у виробництві, для дослідження та контролю механічних та фізичних властивостей конструкцій з ПКМ, існує технологія одночасного виготовлення зразків разом з готовою деталлю, використовуючи ті ж самі матеріали та методи формування. Вона заснована на викладці вихідного матеріалу (препрегу) на плоске пристосування (алюмінієву плиту), яка перед використанням декілька разів знежирюється ацетоном з витримкою $10 \dots 15$ хвилин, покривається спеціальними антиадгезійними розчинами типу Frekote 700 NC для запобігання приставання матеріалу до плити. Кількість шарів обумовлюється конфігурацією кінцевої деталі та різновидами використовуваних препрегів, в залежності від матеріалу наповнювача та орієнтації основи волокна. Шари викладаються поступово зі зняттям захисної плівки, кожен наступний шар розрівнюється роликним катком для запобігання залишків повітря та утворення складок. Після викладання пакету шарів їх накривають дренажною плівкою, зверху плівки, для вбирання залишків в'язучого, настиляють два шари звичайної склотканини марки Т-10-14 або спеціальної жертвної тканини, що виготовлена з нейлону. По контуру плити викладають самоклеючий джгут (стрічку), що забезпечує герметичність вакуумного мішку, який виготовляють з щільної поліетиленової плівки, до якого через технологічний отвір приєднують штуцер для підключення до вакуумної системи. Витримують $5 \dots 7$ хвилин під вакуумом з розрідженням не менше $0,085 \text{ МПа}$ ($0,85 \text{ кгс/см}^2$) для перевірки мішку на відсутність витоків.

Потім підключають пристосування з викладеним пакетом препрегів до вакуумної системи печі та полімеризують згідно режиму готової деталі:

- створити вакуум не менше 0,085 МПа (0,85 кгс/см²);
- підвищити температуру до 125±5°C зі швидкістю 1...2°C/хв;
- витримати при температурі 125±5°C та вакуумному тиску протягом 180±10 хвилин;
- охолодити під вакуумним тиском до 30...40°C зі швидкістю 1...2°C/хв.

Полімеризовану пластину встановлюють на станок з ЧПК та вирізають зразки розмірами (58±2)×(12±1)×(2,0±0,5) мм. Далі їх піддають слюсарній обробці після чого вони готові до випробувань на приладі ДМА. Результати випробувань на приладі дозволяють оцінити дотримання режиму полімеризації, визначивши за графіком температуру склування, якість технології пресування (вакуумування), визначивши найважливішу механічну властивість деталей, що піддають вібраційним та швидкісним навантаженням – модуль пружності, що відповідає за здатність конструкції чинити опір згинальним навантаженням, і тримати заданий профіль (форму), для забезпечення аеродинамічних характеристик, що закладені у конструкції деталі.

У ході дослідів розробили технологію виготовлення зразків з технологічного припуску (рис.3.3) деталі «Лонжерон у зборі» – несучої частини лопаті рульового гвинта вертольота. Зразки були виготовлені методом вирізання зі стінки лонжерона заготовки для подальшої обробки на станку з ЧПК.

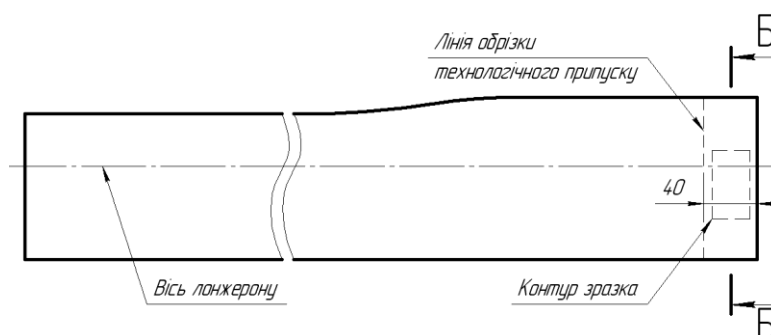


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд деталі «Лонжерон у зборі» з контуром зразка розміщеному у технологічному припуску. Переріз Б-Б див. рис.3.4

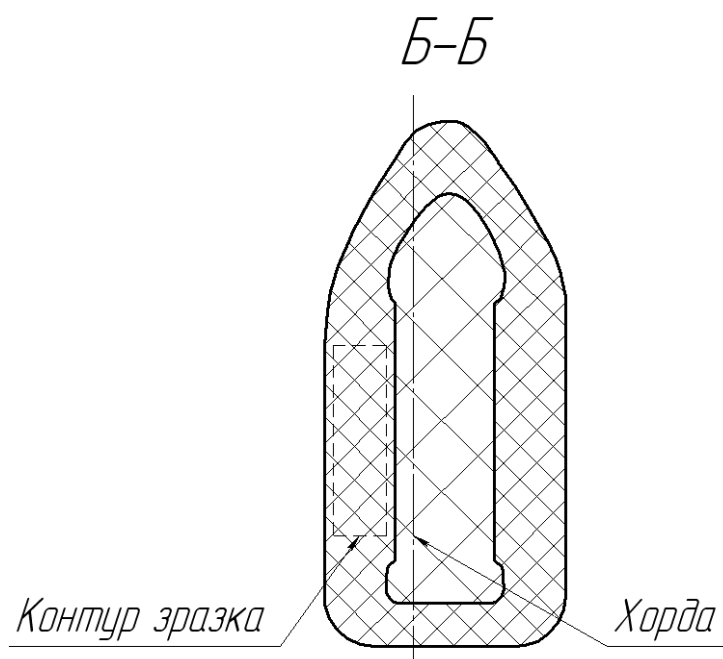


Рисунок 3.4 – Переріз Б-Б (див. рис.3.3)

Зразок вирізали з плоскої поверхні деталі (припуску на мех. обробку), де шари матеріалу збігалися з площиною поверхні, для дотримання відповідності випробувань між зразками виготовленими на плиті. Після перезатиску заготовки зразка в лещатах станка з ЧПК, якість його поверхні та розміри (рис. 3.3) доводилися різальним інструментом за керуючою програмою. Кількість шарів у зразках сягає 10...16 штук.

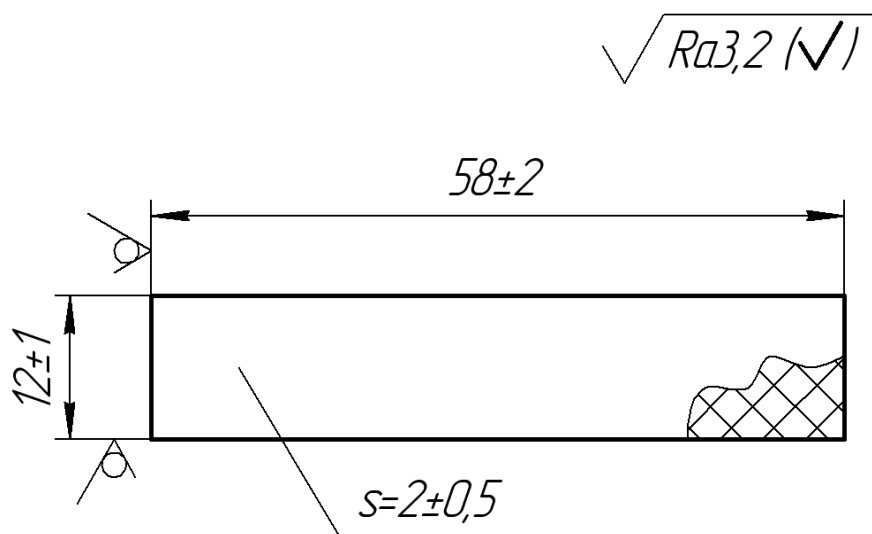


Рисунок 3.5 – Зразок ПКМ для випробувань

3.3 Порядок проведення випробувань

Мікрометр МГ Н25 ГОСТ 6507-90 для вимірювання товщини та ширини зразка. Штангенциркуль ШЦЦ-I-150-0,01 для вимірювання довжини зразка та відстані затиску приладу. Лабораторні ваги JD-320-3 ДСТУ EN 45501:2007 з точністю зважування 0,001 г.

Виміряли товщину, ширину та довжину зразка з похибкою вимірювання не більше 0,025 мм, записали отримані значення. Зважили зразки з похибкою вимірювання не більше 0,001 г та записали отримане значення. Встановлювали зразки у прилад ДМА виходячи з використовуваного методу затиску. У роботі використовували метод триточкового вигину. При встановленні зразка в затисках дотримувались інструкцій виробника: зразок центрують між поверхнями затисків таким чином, щоб він був паралельний основі приладу.

Визначення механічних властивостей проводили за допомогою приладу ДМА TA Instruments DMA Q800 з використанням параметрів приладу, вказаних нижче. Реєстрували дані навантажень та зміщення в залежності від температури.

Швидкість нагріву – $5 \pm 1^\circ\text{C}/\text{хв}$. Цю швидкість нагріву використовували для усіх зразків для забезпечення можливості порівняння результатів. Будь-які зміни швидкості нагріву повинні бути вказані у протоколі випробувань, а результат випробувань вважають не відповідний інструкції виробника. Навантаження зразка проводили з частотою 1 Гц, прилад повинен працювати в режимі постійної деформації. Максимальну амплітуду деформації підтримували в діапазоні, що відповідає лінійній зміні пружності матеріалу. Як правило, використовували відносну деформацію не більше 0,1 %.

Програма зміни температури під час випробувань повинна включати діапазон температур від нормальної або від температури не менш 50°C нижче очікуваної температури склування ДМА до температури не менш 50°C вище очікуваної температури склування ДМА, але нижче температури деструкції. Температура деструкції для використовуваних матеріалів – $175\ldots 190^\circ\text{C}$.

Термопару розташовують якнайближче до зразка. Після проведення випробувань охолоджують піч та виймають зразок. Зважують зразок після випробувань з похибкою не більше 0,001 г та записують отримане значення.

3.4 Порядок оброблення експериментальних даних

Будують графік залежності логарифму динамічного модуля пружності E' та лінійного тангенса кута механічних втрат $\tan \delta$ від температури [20, 21]. При склюванні динамічний модуль пружності полімерного композиту суттєво знижується. Температуру склювання T_g визначають як перетин двох дотичних до кривої динамічного модуля пружності. Першу дотичну (лінія А, рис.3.6) будують через точку, що відповідає температурі до області переходу T_A . Другу дотичну (лінія В, рис.3.6) будують через точку перетину T_B , що знаходиться приблизно в середній точці ділянки падіння динамічного модуля пружності.

На основі графіка залежності лінійного тангенса кута механічних втрат $\tan \delta$ від температури визначають температуру піку тангенса кута механічних втрат T_1 (див. рис.3.6).

Результати випробувань не враховують у випадку відхилення від перебігу випробувань. До можливих відхилень відносять:

- наявність тріщин у зразку, які помітили після випробувань, що може вказувати на відбір проби з дефектної ділянки;
- невідповідність отриманого графіка типовому, наприклад, зміна нахилу кривої, що обумовлено, окрім склювання, надлишковим шумом або існуванням більш ніж одного переходу, але це повинно бути підтверджено окремим дослідом;
- проковзування зразка у затисках.

При необхідності зберігають результати таких випробувань вказуючи в протоколі випробувань допущені відхилення від вимог.

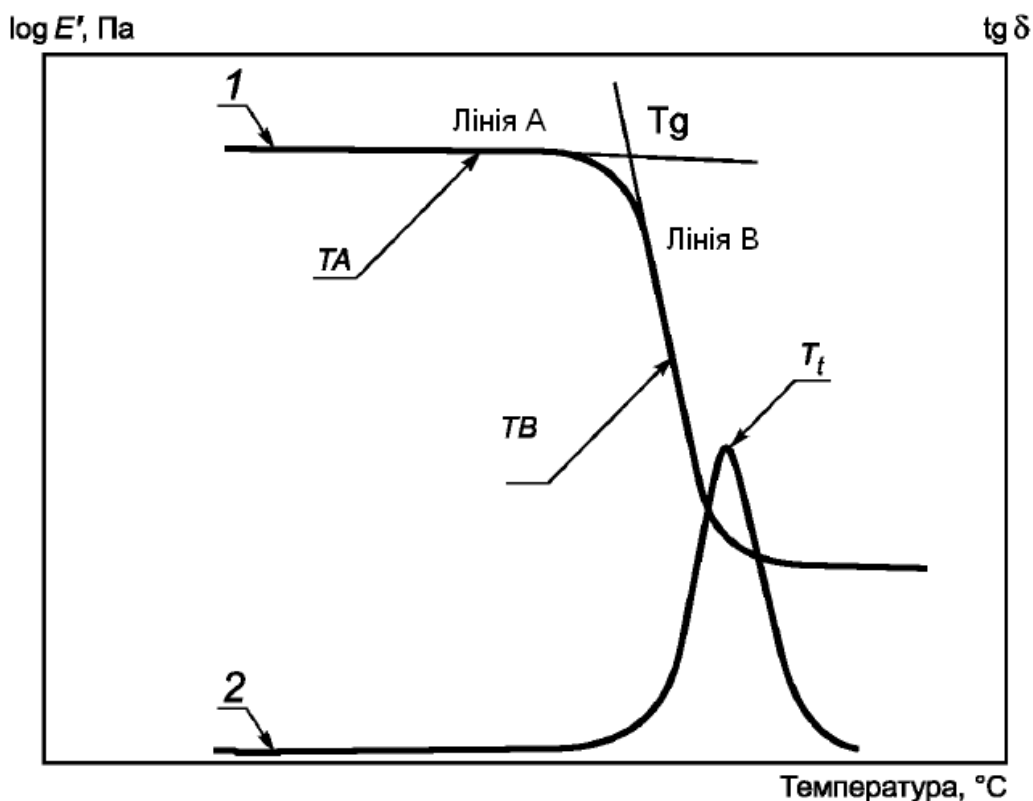


Рисунок 3.6 – Визначення температури склування T_g та піку тангенса кута механічних втрат: 1 – графік логарифма динамічного модуля пружності E' ; 2 – графік тангенса кута механічних втрат $\tan \delta$; T_1 – температура піку тангенса кута механічних втрат [20, 21]

3.5 Результати порівняння виробничої технології з розробленою

У ході робіт використовували зразки, що виготовленні за методом вакуумного пресування – перша група, та зразки, виготовленні за допомогою розробленою технології, яка включає механічну обробку технологічного припуску готової деталі на станку з числовим програмним керуванням (ЧПК) – друга група. Обидві групи зразків складаються з шарів вуглецевої тканини (препрегу), з чергуванням напрямку основи $0/90^\circ$ та $\pm 45^\circ$. Зразки першої групи виготовляли за технологією що використовується у виробництві, а саме методом викладки препрегу на металеву пластину, покриваючи дренажною плівкою, жертвною тканиною та вакуумним мішком з поліетилену. Витримали 5...7 хвилин під вакуумом з розрідженням не менше 0,085 МПа (0,85 кгс/см²)

для перевірки мішку та вакуумної системи на відсутність витоків. Потім підключили пристосування з викладеними препрегами до вакуумної системи печі та полімеризували згідно режиму готової деталі:

- створити вакуум не менше 0,085 МПа (0,85 кгс/см²);
- підвищити температуру до 125±5°C зі швидкістю 1...2°C/хв;
- витримати при температурі 125±5°C та вакуумному тиску протягом 180±10 хвилин;
- охолодити під вакуумним тиском до 30...40°C зі швидкістю 1...2°C/хв.

Полімеризовану пластину з десяти шарів препрегу встановлюють на станок з ЧПК та вирізають зразки розмірами (58±2)×(12±1)×(2,0±0,5) мм. Далі їх піддають слюсарній обробці після чого вони готові до випробувань.

На відміну від першої групи, де станок з ЧПК забезпечив тільки нарізання пластини на окремі зразки, зразки другої групи, які були виготовлені за запропонованою технологією – методом вирізання зі стінки заздалегідь полімеризованого лонжерона, що забезпечує несучу здатність та міцність всієї конструкції лопаті. Зразок вирізали з плоскої поверхні деталі (припуску на мех. обробку), де шари матеріалу збігалися з площиною поверхні, для дотримання відповідності випробувань між групами. Режим полімеризації для зразків другої групи відповідає зразкам першої, але твердіння відбувалося у металевій матриці під тиском >50 тонн. Розміри зразків відповідають розмірам першої групи. Кількість шарів у зразках сягає 10...16, на відміну від зразків першої групи. Кількість шарів більша через те, що пресування забезпечили у пристосуванні до якого приклали навантаження у 50 тонн.

Були проведені випробування зразків на дослідження температури склування та модуля пружності в залежності від методу виготовлення. За результатами випробувань приладом TA Instruments DMA Q800 були побудовані графіки залежності модуля пружності та лінійного тангенса кута механічних втрат від температури. Результати випробувань наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати випробувань

Перша група			Друга група		
Номер зразка	Температура склування T_g , °C	Модуль пружності E , ГПа	Номер зразка	Температура склування T_g , °C	Модуль пружності E , ГПа
1	126,86	~ 10,25	1	124,35	~ 8,25
2	120,29	~ 13,5	2	121,46	~ 9,25
3	120,05	~ 17,5	3	124,09	~ 9,5
4	109,94	~ 14	4	127,24	~ 9,8

Спостерігається велика розбіжність між значеннями модуля пружності зразків виробничої технології – першої групи (рис.3.7, 3.8, 3.9, 3.10). Це вказує на те, що метод виготовлення зразків одночасно з кінцевою деталлю однакової партії матеріалів, однаковим режимом полімеризації, але різною підготовкою та проведенням формування не підходить для оцінки саме механічних властивостей матеріалів, але при дотриманні технології можна отримувати задовільні значення температури склування для того, щоб зробити висновок про витримку деталі в печі, та її подальшу якість при експлуатації.

За графіками бачимо, що значення температури склування відповідає режиму полімеризації у всіх випадках, окрім зразка №4 першої групи (рис.3.10). Цей зразок було пошкоджено при виготовленні, оскільки технологія кінцевої обробки виробничої технології не може забезпечити якість усіх зразків.

На відміну від першої групи значення модуля пружності зразків запропонованої технології виготовлення – другої групи (рис.3.11, 3.12, 3.13, 3.14) не мають такої розбіжності між собою. Це вказує на те, що при виготовленні зразків безпосередньо із самої деталі (припуску на мех. обробку), значення механічних властивостей не піддаються впливу факторів при виготовленні зразків «вручну»: недостатній контроль за розрідженням (вакуумом), необережність при діставанні зразків з розкросної пластини, необережність виконавця. Але зазначимо, що значення модуля пружності дещо нижчі, ніж у зразків першої групи. На це дає відповідь вплив механічної

обробки, що необхідна для надання зовнішнього вигляду зразка. Під час дії різального інструменту створюються коливання та вібрації, що спричиняють утворенню мікротріщин, порушуючи внутрішні зв'язки між волокном та в'язучим. Тому в кінцевому вигляді ми бачимо нижчі, але набагато доцільніші та постійні показники модуля пружності через те, що в технологічному процесі виготовлення у металевих матрицях препреги при полімеризації отримують більш великі навантаження, ніж під час вакуумування поліетиленовим мішком. Також зменшення кінцевого значення спричиняє вилучення деталі з матриці, тому що після полімеризації кінцева деталь залишається у сталому об'ємі, а прес-матриця, будучи металевою, зменшується у об'ємі, стискаючи деталь.

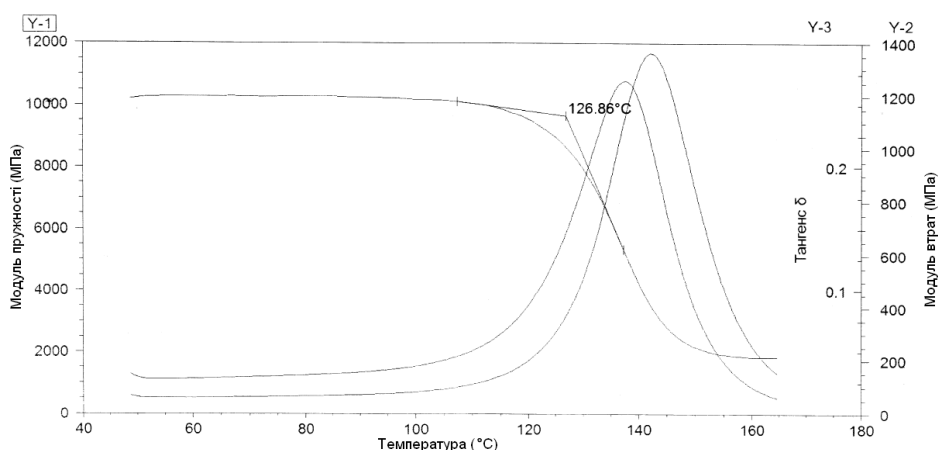


Рисунок 3.7 – Графік залежності модуля пружності та лінійного тангенса кута механічних втрат від температури зразка №1 першої групи

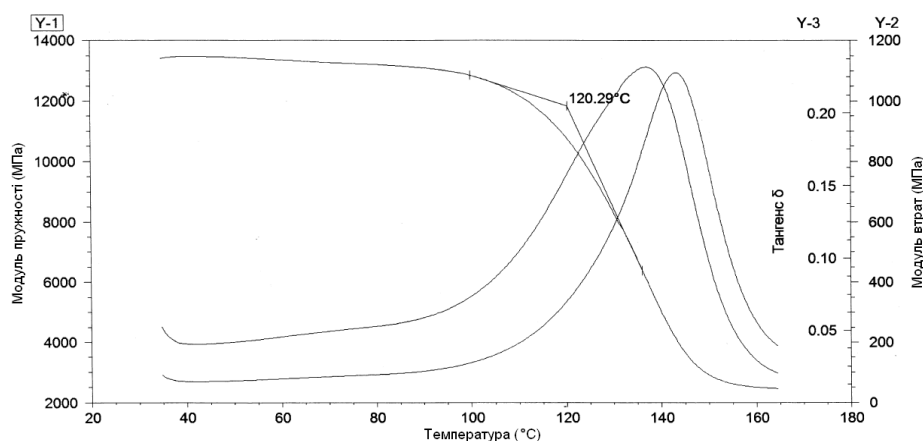


Рисунок 3.8 – Графік залежності модуля пружності та лінійного тангенса кута механічних втрат від температури зразка №2 першої групи

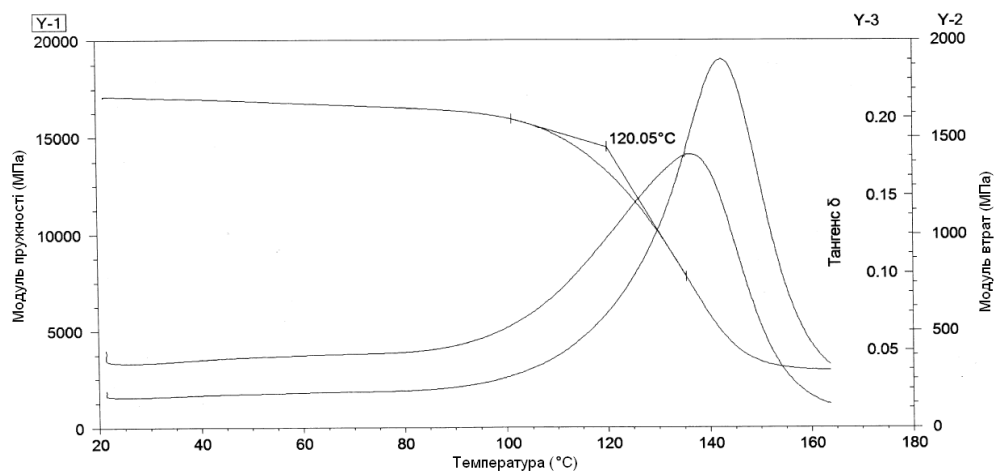


Рисунок 3.9 – Графік залежності модуля пружності та лінійного тангенса кута механічних втрат від температури зразка №3 першої групи

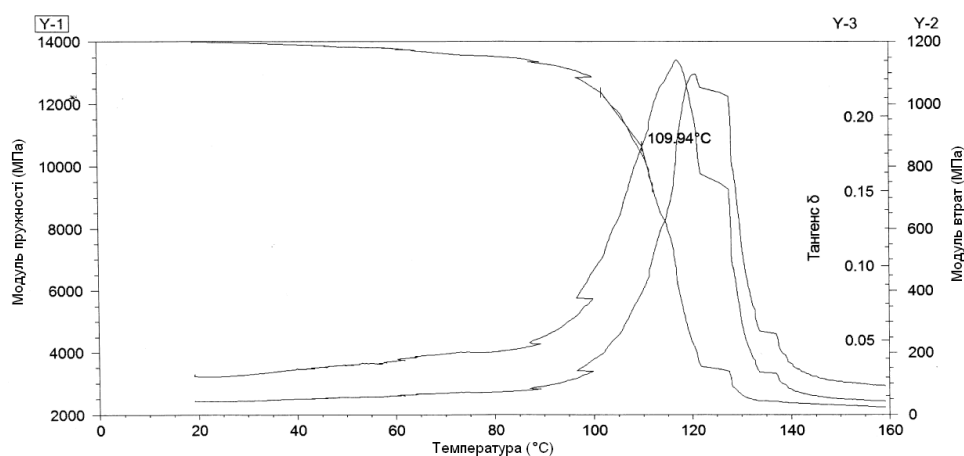


Рисунок 3.10 – Графік залежності модуля пружності та лінійного тангенса кута механічних втрат від температури зразка №4 першої групи

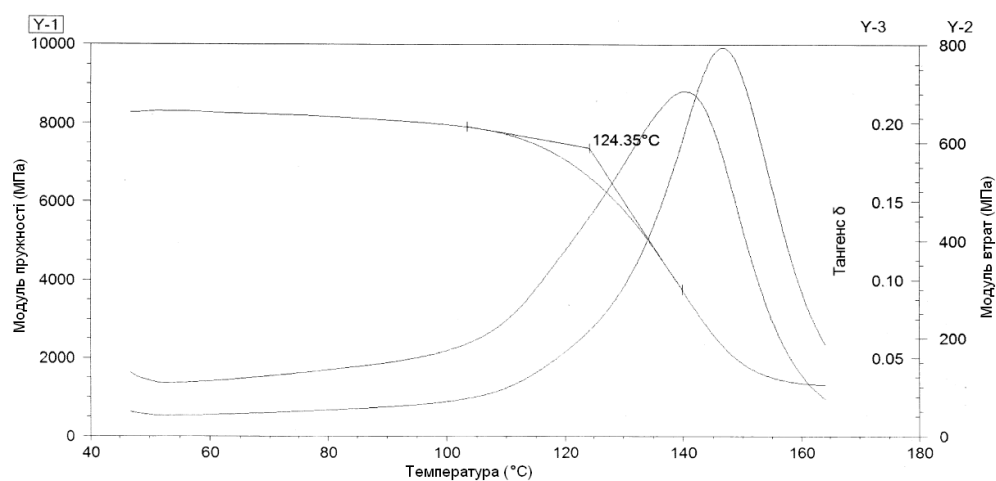


Рисунок 3.11 – Графік залежності модуля пружності та лінійного тангенса кута механічних втрат від температури зразка №1 другої групи

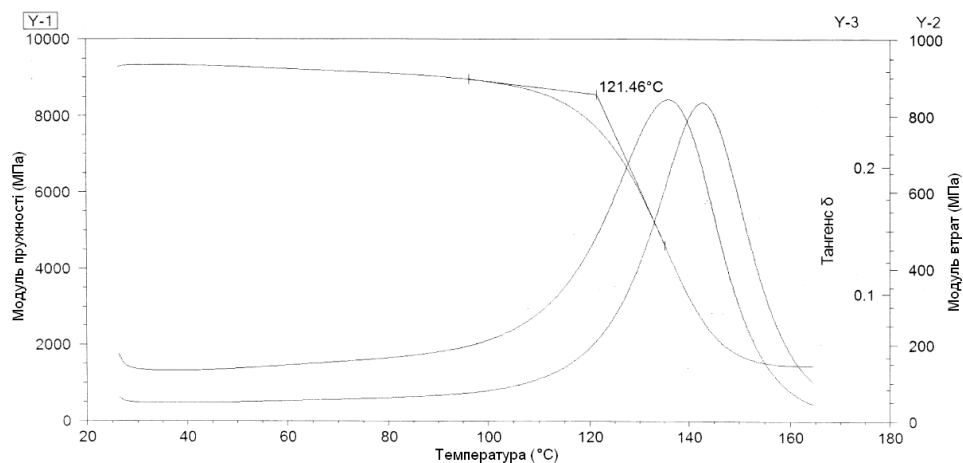


Рисунок 3.12 – Графік залежності модуля пружності та лінійного тангенса кута механічних втрат від температури зразка №2 другої групи

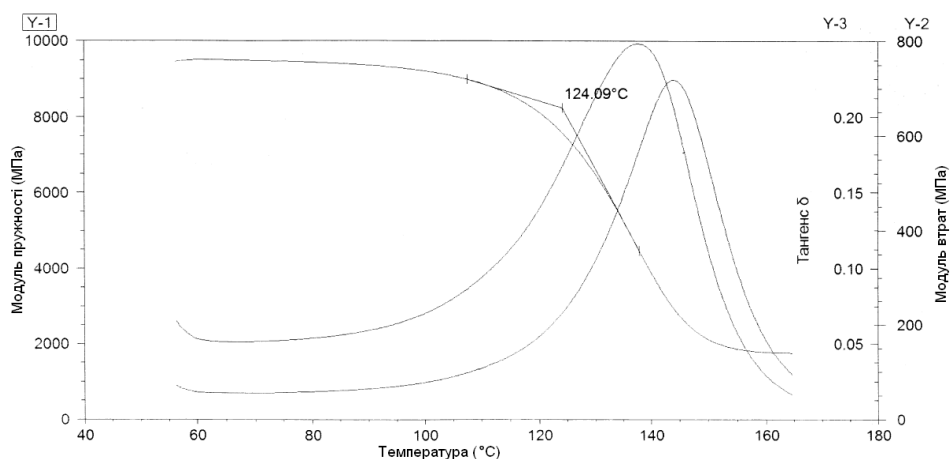


Рисунок 3.13 – Графік залежності модуля пружності та лінійного тангенса кута механічних втрат від температури зразка №3 другої групи

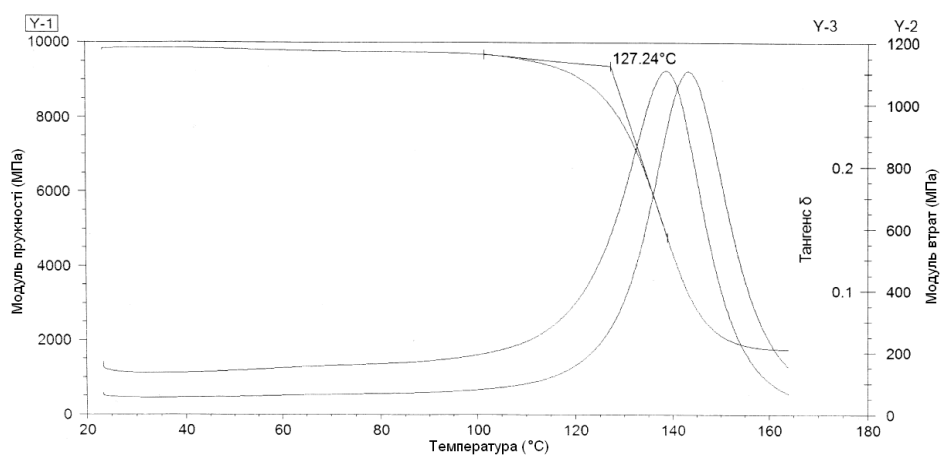


Рисунок 3.14 – Графік залежності модуля пружності та лінійного тангенса кута механічних втрат від температури зразка №4 другої групи

ВИСНОВКИ

Об'єктом досліджень була силова деталь лопаті рульового гвинта вертольота – «Лонжерон у зборі». Метою досліджень було порівняння існуючої виробничої технології виготовлення зразків із запропонованою у роботі. За результатами проведення даної дослідницької роботи можна зробити наступні висновки:

1. У дипломній роботі було розроблено технологію виготовлення зразків для підвищення механічних властивостей конструкцій з ПКМ. Дослідження проводилися на визначення модуля пружності та температури склування, що є важливими показниками якості, міцності та довговічності конструкцій з ПКМ, що використовуються в авіації.

2. Виробнича технологія показала, що при виникненні факторів недотримання вимог режимів полімеризації, відсутності неруйнівного контролю та особливостей обробки зразків, виникають великі розбіжності у показниках механічних властивостей та наявність похибки, вплив якої непомітний при зовнішньому огляді.

3. Розроблена технологія виключає вплив недотримання режиму полімеризації, відсутності неруйнівного контролю та особливостей обробки. Запропонована технологія показує більш дійсні результати механічних випробувань, які утримуються в одному інтервалі показників та не мають розбіжностей.

4. Виготовлення зразків з безпосередньо деталі вказує на те, що будуть витримані всі технологічні режими, результати випробувань відобразять фактори недотримання режиму полімеризації, відсутності належної підготовки прес-форми та необережності виймання деталі з пристосування, що впливають на деталь.

5. Також зберігається час на виготовлення зразків, не витрачаються зайві коштовні матеріали. При подальшому вдосконаленні технології можна

скоротити час на виготовлення зразків, тим самим забезпечивши технологічність та доцільність проведення випробовувань на підтвердження властивостей, що регламентуються кресленнями та відповідальністю деталі.

6. Розроблена технологія повністю виправдала себе у виготовленні зразків, показала більш чіткі результати випробувань, тим самим забезпечивши якість та надійність кінцевих деталей.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Углепластики и стеклопластики нового поколения /И. И. Соколов, А. Е. Раскутин // Труды ВИАМ: электронный журнал, 2013.
3. Богуслаєв В.О., Качан О.Я., Калініна Н.Є., Мозговий В.Ф., Калінін В.Т. – Авіаційно-космічні матеріали та технології. – Запоріжжя: Видавництво ВАТ «Мотор Січ», 2009 р. – 383 с.
3. Механические испытания углепластика с эпоксидной матрицей /В.А.Юдин и др. // Materials Physics and Mechanics, 2017.
4. Композиционные материалы. Справочник. – М.: Машиностроени, 1990. – 325 с.
5. Композиционные материалы. Справочник / Под. ред. Д.М. Карпиноса. – К.: Наукова думка, 1985. – 380 с.
6. Композиционные материалы / Под ред. Л. Браутмана. Ч.І. Анализ и проектирование конструкций / Под ред. К. Чамиса. Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1978. – 246 с.
7. Современные технологии производства полимерных композиционных материалов нового поколения / П.Н. Тимошков, Д.И. Коган // Труды ВИАМ: электронный журнал, 2013.
8. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учебное пособие / Л.И. Бондалетова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.
9. Методы оценки эксплуатационных свойств деталей из полимерных композиционных материалов: метод. пособие / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. – М.: МАДИ, 2017. – 84 с.
10. Уровни дефектов структуры в изделиях из композиционных материалов, возникающих в процессе их производства / В.Е.Гайдачук, В.А.Коваленко //Авиационно-космическая техника и технология, 2012.

11. Реми Детер и Жерар Фройер, Введение в полимерные материалы, Париж, Лавуазье – Техника и документация, 1997, 215 с.
12. Материалы в машиностроении. Т.5. Неметаллические материалы. Справочник / Под ред. Кудрявцева И.В. – М.: Машиностроение, 1969. – 544 с.
13. Чарльз Б. Арендс, «Повышение прочности полимеров», Нью-Йорк, Марсель Деккер, сб. «Пластмасса инжиниринг» 1996, 415 с.
14. Формирование дефектного поверхностного слоя при разрезке деталей из карбон-карбоновых и карбон-полимерных композитов / А.Ф. Саленко и др. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2018.
15. Надежность выявления поверхностных дефектов композитной конструкции при визуальном эксплуатационном контроле / Ю.М. Фейгенбаум, С.В. Дубинский // Научный вестник ГосНИИ ГА, 2016.
16. Волокнистые композиционные материалы / Пер. с англ., – М.: Мир.
17. Свойства конструкционных углепластиков, изготовленных пропиткой под вакуумом /Д.И. Коган и др. // Известия Самарского научного центра РАН, 2012, том 14.
18. Исследование свойств волокнистых полимерных композиционных материалов / Д.В. Криворучко и др. // Сучасні технології в машинобудуванні, 2014, вип. 9.
19. Тернопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композиционные материалы. Справочник.– М.: Машиностроение, 1987. –224 с.
20. ASTM D7028-07 (2015) Standard Test Method for Glass Transition Temperature of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis.
21. ГОСТ Р 57739-2017. Композиты полимерные. Определение температуры стеклования методом динамического механического анализа.
22. TA Instruments. THERMAL ANALYSYS © TA Instruments. 2010.
23. Контроль качества авиационных деталей из полимерных композиционных материалов и многослойных клееных конструкций / В.В. Мурашов и др. // Авиационные материалы и технологии, 2013.