

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

**Кафедра прикладної механіки та інженерії матеріалів**

**ДОПУСТИТИ ДО  
ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри  
д.т.н., професор  
\_\_\_\_\_ Оксана  
МІКОСЯНЧИК  
“21” листопада 2022 р.**

**Кваліфікаційна робота**

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

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

**Виконавець: \_\_\_\_\_ Валентин ЛИТВИНЕНКО**

**Керівник: д.т.н., професор \_\_\_\_\_ Оксана МІКОСЯНЧИК**

**Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:**

**розд. “Охорона навколишнього середовища” \_\_\_\_\_ Володимир МЕЛЬНИК**

**Нормоконтролер: Оксана МІКОСЯНЧИК**

**КИЇВ 2022**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Аерокосмічний факультет**

**Кафедра прикладної механіки та інженерії матеріалів**

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

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
д.т.н., професор  
\_\_\_\_\_ Оксана МІКОСЯНЧИК  
“07” вересня 2022 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на виконання кваліфікаційної роботи**

\_\_\_\_\_ Валентин ЛИТВИНЕНКО \_\_\_\_\_

- 1. Тема кваліфікаційної роботи** «Удосконалення процесу оцінки якості виробів з композиційних матеріалів в авіабудування» затверджена наказом ректора № 1421/ст від 13.09.2022 року
- 2. Термін виконання роботи:** з 05 вересня по 30 листопада 2022 року
- 3. Вихідні дані до роботи:** Технологічні процеси виготовлення композиційних матеріалів, міцнісні характеристики виробів з композиційних матеріалів, моделі формування показників якості, методи контролю якості композиційних матеріалів, нормативні документи оцінки якості виробів з композиційних матеріалів.
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. Розділ 1. Аналіз та існуючі системи якості в авіаційній техніці. Розділ 2. Аналіз існуючих нормативних документів та методів оцінки композитних матеріалів в авіабудуванні. Розділ 3. Матеріали та оцінка якості досліджуваних композитних матеріалів. Розділ 4. Вплив композитних матеріалів на навколишнє середовище.
- 5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу:**  
1. Вступ, 2. Оцінка якості полімерного композиційного волокна, 3. Огляд діючих нормативних документів КМ, 4. Методи неруйнівного контролю для виробів із композиційних матеріалів, 5. Класифікація дефектів при виробництві деталей з композиційних матеріалів, 6. Причинно-наслідкова діаграма (діаграма Ісікаві), 7. Рекомендований кут укладання волокон при виготовленні деталей з КМ.

## 6. Календарний план-графік

№ п/п	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Ознайомитися з літературою та сформуванати структуру дипломної роботи.	05.09-02.10 2022	
2.	Написати вступ	03.10-10.10. 2022	
3.	Розробити розділ 1:	11.10-20.10 2022	
4.	Розробити розділ 2:	21.10-30.10 2022	
5.	Розробити розділ 3:	31.10-10.11 2022	
6.	Сформулювати висновки по роботі.	11.11-15.11 2022	
7.	Оформити дипломну роботу та здати на рецензію.	16.11-23.11. 2022	

## 7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона навколишнього середовища	Доцент Володимир МЕЛЬНИК	07.09.2022 Володимир МЕЛЬНИК	21.11.2022 Володимир МЕЛЬНИК

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_  
(підпис керівника)

Оксана МІКОСЯНЧИК  
(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_  
(підпис випускника)

Валентин ЛИТИВНЕНКО  
(П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Удосконалення процесу оцінки якості виробів з композиційних матеріалів в авіабудуванні»: сторінок 98, рисунків 57, таблиць 9, використаних джерел 34.

**КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ, ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА, СИСТЕМА ЯКОСТІ, КВАЛІМЕТРІЯ, НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ, ДЕФЕКТИ, ДІАГРАМА ІСІКАВИ, МЕЖА МІЦНОСТІ ПРИ РОЗТЯГУВАННІ.**

**Об'єкт дослідження** – рецептурно-технологічні фактори виробництва перехресно-армований композиційний матеріал, виготовлений з однонаправленої вуглецевої тканини SkyCarbon.

**Предмет дослідження** – розробка критеріїв оцінки якості при виготовленні, формуванні та дослідженні міцнісних характеристик виробів з композиційних матеріалів для удосконалення технологічних операцій на всіх етапах їх виробництва.

**Мета дослідження** - удосконалення процесу оцінки якості виробів з композиційних матеріалів на етапі розробки

**Методи дослідження** – внутрішній аудит, кваліметрична оцінка якості послуг лабораторії з калібрування (експертний метод), методи оцінки механічних властивостей композиційних матеріалів, причинно-наслідкові зв'язки оцінки якості виробів з композиційних матеріалів, неруйнівні методи контролю якості виробів з композиційних матеріалів.

За одержаними експериментальними значеннями руйнівного навантаження встановлено, що перехресно-армований КМ характеризується найвищою міцністю при куті укладання 0 градусів в напрямку прикладеного навантаження, зростання кута укладання армуючих вуглеволокон до 90<sup>0</sup> призводить до зниження руйнівного навантаження в 95 разів. Таким чином, залежно від кута укладання проявляється анізотропія міцності КМ. Мінімальний кут укладання, який має меншу розбіжність з напрямком прикладання сили, призводить до зниження руйнівного навантаження в 1,3 рази.

Застосоване в роботі дослідження може використовуватись в практичній діяльності з метою підвищення міцності виробів з композиційних матеріалів на етапі технологічного виробництва.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	
<b>РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТА ІСНЮЮЧІ СИСТЕМИ ЯКОСТІ В АВІАЦІЙНІЙ ТЕХНІЦІ</b> .....	12
1.1. Якість авіаційної техніки, характеристики якості.....	12
1.2. Управління якістю авіаційної техніки.....	15
1.3. Рівень якості, формування показників якості виробів авіаційної техніки.....	21
1.4. Моделі формування показників якості.....	26
1.5. Виявлення і аналіз чинників, що впливають на якість виробів.....	30
Висновки до розділу 1.....	34
<b>РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ІСНЮЮЧИХ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ ТА МЕТОДІВ ОЦІНКИ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ В АВІАБУДУВАННІ</b> .....	35
2.1 Огляд діючих нормативних документів в сфері композитних матеріалів.....	35
2.2. Методи контролю якості композиційних матеріалів на етапі виробництва.....	38
2.3 Критерії оцінки методами неруйнівного контролю.....	44
2.4. Види дефектів в композитних матеріалів.....	47
Висновки до розділу 2.....	76
<b>РОЗДІЛ 3 МАТЕРІАЛИ ТА ОЦІНКА ЯКОСТІ ДОСЛІДЖУВАНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ</b> .....	77
3.1 Використання діаграми Ісікави при оцінці якості виробів з композиційних матеріалів.....	77
3.1. Оцінка якості полімерного композиційного матеріалу за критерієм міцності.....	82
Висновки до розділу 3.....	88

<b>РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ ЧИННИКІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ .....</b>	<b>Помилка! Закладку не визначено.</b>
4.1 Вплив епоксидних смол на людину .....	90
4.2. Основні правила техніки безпеки з композитними матеріалами на виробництві.....	91
Висновки до розділу 4 .....	92
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>93</b>
<b>СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ .....</b>	<b>95</b>

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ**

КМ – композитні матеріали

ЗОР – змащувально-охолоджувальна речовина

ЕС – епоксидні сполуки

АВ – армуючі волокна

ВВ – вуглецеві волокна

НК – неруйнівний контроль

ПС – повітряне судно

ТПВ – технологічна підготовка виробництва

ПКМ – полімерні композиційні матеріали

ТП – технологічні процеси

ВСП – вихрострумові перетворювачі

ТУ – технчні умови

## ВСТУП

Композиційні матеріали широко використовуються в авіаційній промисловості та дозволили інженерам подолати перешкоди, які виникли під час використання матеріалів окремо. Складові матеріали зберігають свою ідентичність у композитах, разом ці матеріали створюють «гібридний» матеріал із покращеними структурними властивостями. Розробка легких, стійких до високих температур композитних матеріалів дозволить матеріалізувати наступне покоління високоефективних, економічних конструкцій повітряних суден (ПС). Використання таких матеріалів зменшить споживання палива, підвищить економічність і знизить прямі експлуатаційні витрати ПС.

Якщо у ранні періоди 1960-х роках використання композиційних матеріалів світовими лідерами літакобудування (корпораціями Airbus и Boeing) в авіалайнерах становило лише 5% від загальної ваги, то зараз цей показник становить близько 53% від загальної ваги, наприклад, літаках типу Airbus A350, A-340 та B-777 [1].

Адаптовані технології захисту матеріалів для зменшення впливу на навколишнє середовище та підвищення вогнестійкості необхідні для виконання високих вимог безпеки в авіації. Моделювання та оцінка якості екологічно покращених композитних матеріалів в авіаційному секторі в рамках міжнародної співпраці китайських та європейських партнерів спрямовані на оптимізоване використання матеріалів, тоді як оцінка життєвого циклу має на меті довести екологічні переваги порівняно з найсучаснішими синтетичними матеріалами [2].

Технології виготовлення КМ для забезпечення високої якості повітряних суден (ПС) та технологічні процеси літакобудівного виробництва характеризуються істотними відмінностями в порівнянні з технологічними процесами, застосовуваними в загальному машинобудуванні, через характерні особливості об'єкту виробництва. В конструкції літака з композиційних



матеріалів можна виготовити фюзеляж, крила, хвостове оперення, мотогондоли, деталі інтер'єру. Найчастіше для літаків застосовується більш легкий вуглепластик, а склопластик - для ненавантажених деталей і для носового обтічника. Склопластик важче, ніж вуглепластик, і менш міцний, але він значно дешевше. Носовий обтічник літака роблять зі склопластику, так як ця деталь повинна пропускати радіохвилі, а вуглеволокно проводить струм і створює перешкоди [3].

**Метою роботи** є удосконалення процесу оцінки якості виробів з композиційних матеріалів на етапі вибору оптимальної технології їх виготовлення та розробка алгоритму організації експериментальних досліджень для визначення міцнісних характеристик створених КМ.

Розробка і створення деталей з композиційних матеріалів, а також розробка і дослідження характеристик нового КМ є комплексом складних і пов'язаних завдань. Підхід до вирішення таких завдань полягає у виборі оптимального поєднання технологій і матеріалів; проведенні комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану конструкцій і застосування сучасних технологічних процесів виробництва.

Можливість точно передбачити характеристики композитних матеріалів під час виробництва має вирішальне значення для забезпечення надійності конструкцій, що надасть перспективи для збільшення використання долі композитів і прискорення їх впровадження. Тому **актуальним напрямком досліджень** є розробка методів, направлених на оцінку якості та прогнозування властивостей вже готового виробу.

Для забезпечення ефективного удосконалення процесу оцінки якості виробів з композиційних матеріалів необхідно вирішити наступні завдання:

- вивчити визначальні чинники процесу формування якісних ознак виробів з КМ;
- розробити систему забезпечення якості виробів з КМ за вимогами міжнародних (ІСО, ІКАО) та національних стандартів;
- запропонувати алгоритм причинно-наслідкових зв'язків для виявлення

ключових параметрів, характеристик та технологічних процесів, що впливають на якість виробів.

**Об'єкт дослідження** – рецептурно-технологічні фактори виробництва перехресно-армований композиційний матеріал, виготовлений з однонаправленої вуглецевої тканини SkyCarbon.

**Предмет дослідження** – розробка критеріїв оцінки якості при виготовленні, формуванні та дослідженні міцнісних характеристик виробів з композиційних матеріалів для удосконалення технологічних операцій на всіх етапах їх виробництва.

**Методи, застосовані в дипломній роботі:** внутрішній аудит, кваліметрична оцінка якості послуг лабораторії з калібрування (експертний метод), методи оцінки механічних властивостей композиційних матеріалів, причинно-наслідкові зв'язки оцінки якості виробів з композиційних матеріалів, неруйнівні методи контролю якості виробів з композиційних матеріалів.

**Наукова новизна отриманих результатів полягає в:** визначенні впливу значимих показників на рівень якості технологічного процесу виготовлення композиційних матеріалів, оцінці причин появи виробничих дефектів композитів та запропонованій діаграмі Ісікави причинно-наслідкових зв'язків технологічного процесу виготовлення виробів з композиційних матеріалів, оцінці впливу кута укладання армуючих вуглеволокон перехресно-армованого композиційного матеріалу на міцність виробів.

**Практична цінність отриманих результатів** полягає в визначенні визначальних чинників процесу формування якісних ознак виробів з КМ; розробці системи забезпечення якості виробів з КМ за вимогами міжнародних (ІСО, ІКАО) та національних стандартів; запропонованому алгоритмі причинно-наслідкових зв'язків для виявлення ключових параметрів, характеристик та технологічних процесів, що впливають на якість виробів.

Наукові праці:

В.А. Литвиненко, О.О. Скворцов, О.О. Мікосянчик Оцінка якості

полімерного композиційного матеріалу за критерієм міцності / The Tenth World Congress "AVIATION IN THE XXI-st CENTURY" Safety in Aviation And Space Technologies September 28-30, 2022. – P.1.3.5-1.3.8.

О. О. Мікосянчик, В. А. Литвиненко, О. Ю. Жосан, Є. В. Педан Оцінка якості виробів з композиційних матеріалів за характеристиками міцності / Проблеми тертя та зношування. – 2022. - 3 (96). – С.30-38

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ТА ІСНУЮЧІ СИСТЕМИ ЯКОСТІ В АВІАЦІЙНІЙ ТЕХНІЦІ

#### 1.1. Якість авіаційної техніки, характеристики якості

Вимоги, що пред'являються до якості виробів, встановлюються тоді, коли визначені з граничною точністю призначення і експлуатаційні характеристики виробів. Вимоги можуть бути розділені на три категорії:

- абсолютної якості (для виробів ракетної техніки, космічних, атомних об'єктів і т.п., теоретична ймовірність відмови яких повинна бути надзвичайно мала);
- високої якості (для виробів авіаційної техніки, суден, автомобілів та інших виробів, пов'язаних із забезпеченням безпеки людей);
- оптимальної якості (з урахуванням економічності і рентабельності для виробів масового споживання).

Дослідження якості продукції включає в себе визначення рівня якості, виявлення причин і факторів, що обумовлюють цей рівень. При дослідженні якості продукції насамперед вивчаються визначальні чинники процесу формування якісних ознак, що є елементом дефектології, а потім розробляють або вибирають методи контролю.

Якість продукції формується на стадії її розробки, забезпечується у виробництві, підтримується в експлуатації.

Для управління якістю продукції на підприємствах використовують системи забезпечення якості, вимоги до яких сформульовані в міжнародних (ІСО, ІКАО) та національних стандартах. Такі стандарти включають в себе моделі для забезпечення якості на різних етапах виробництва і використання продукції. Відповідність системи якості вимогам стандартів ІСО є певною гарантією забезпечення стабільної якості продукції.

При управлінні якістю авіаційної техніки вимоги льотної придатності передбачають оцінку комплексу показників якості конструкцій, що несуть основне навантаження, включаючи дані випробувань і експлуатації. При

цьому повинна оцінюватися цілісність конструкції і проводитися належна оцінка експлуатаційних спектрів навантаження, розподілу навантажень по конструкції і властивостей матеріалу.

Кваліметрія - наукова галузь, яка об'єднує методи кількісної оцінки якості продукції та вирішальні завдання обґрунтування номенклатури показників якості: розробки методів визначення показників якості та їх оптимізації (рис.1.1)



Рис.1.1. Структура кваліметрії

Безпека пошкодження (живучість) - особливість конструкцій (застосовується для повітряних судів), яка полягає в тому, що в разі появи протягом терміну служби конструкції серйозного пошкодження внаслідок втоми, корозії або іншого руйнування інша частина конструкції може витримувати допустимі навантаження без руйнування або великої деформації до тих пір, поки пошкодження не буде виявлено (ІКАО ДОС 9642-А 4941).

Експлуатаційна живучість включає в себе два принципи: безпеку руйнування (fail-safe) і допустимість пошкодження (damage tolerance).

Безпека руйнування (fail-safe) є властивість конструкції забезпечувати необхідну (нормовану) залишкову міцність після часткового або повного руйнування основного силового елемента, яке виявляється при частих візуальних оглядах конструкції.

Допустимість пошкодження (damage tolerance) - це властивість конструкції забезпечувати необхідну залишкову міцність при наявності пошкодження до тих пір, поки таке пошкодження не буде виявлено за допомогою неруйнівних методів контролю при порівняно рідкісних періодичних формах контролю.

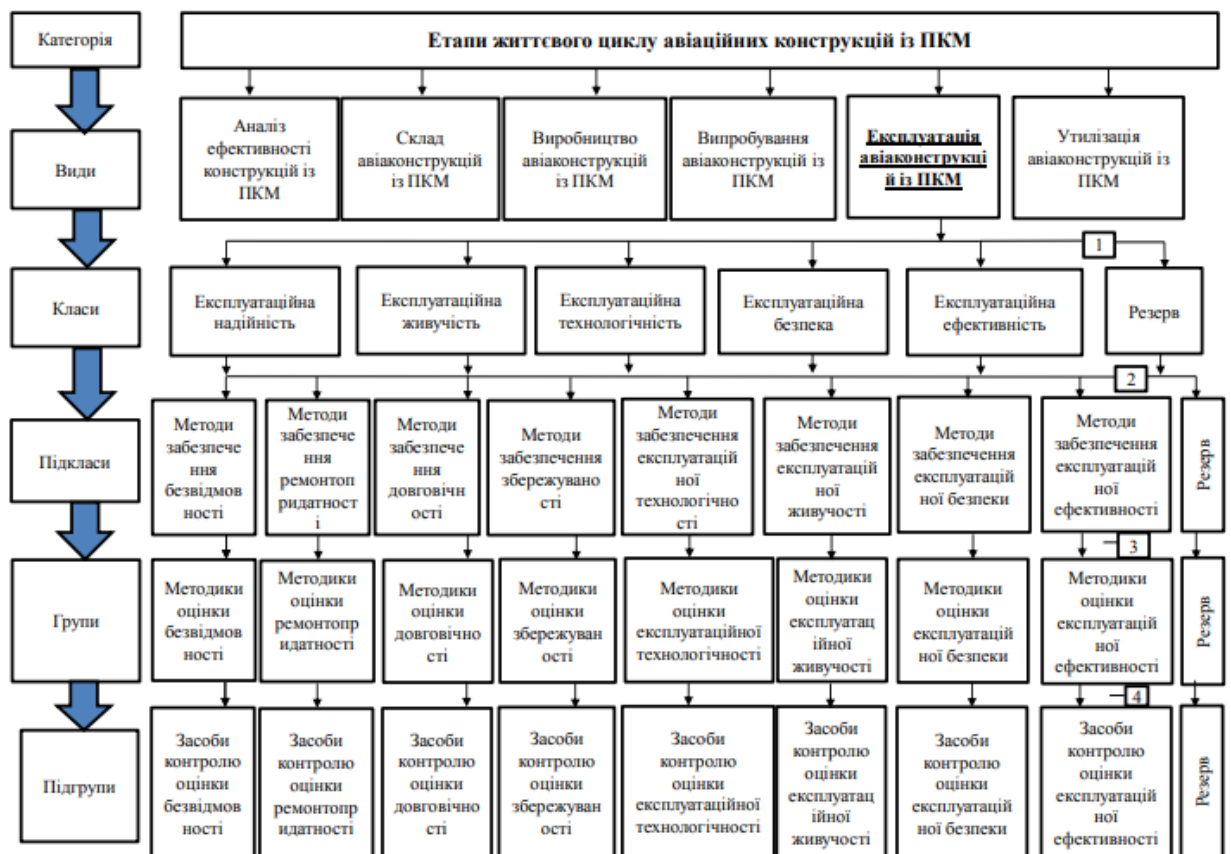


Рис. 1.2. Життєвий цикл авіаційних конструкцій із ПКМ

Критерії льотної придатності - це критерії, що регламентують проектування, технічні характеристики, матеріали, якість роботи, технологію виготовлення, технічне обслуговування та доопрацювання чи внесення змін до авіаційних виробів, встановлені компетентним органом з льотної придатності.

Авіаційний виріб - будь-яке цивільне повітряне судно або призначені для установки на ньому авіаційний двигун, гвинт, система, матеріал, частина або агрегат, нові або перебували в експлуатації.

Повноважний орган з льотної придатності - це національна урядова організація, що відповідає за регламентацію в області сертифікації, затвердження або визнання відповідності авіаційних виробів нормам льотної придатності і охорони навколишнього середовища. Життєвий цикл авіаційних конструкцій із ПКМ зображено на рис.1.2.

## **1.2. Управління якістю авіаційної техніки**

Питання управління якістю виробів авіаційної техніки на підприємстві вирішуються відповідно до системи забезпечення якості, яка розробляється на основі галузевих, національних і міжнародних стандартів. Концентрований Міжнародний досвід управління якістю продукції відображений в стандартах ISO серії 9000, які знаходять все більше застосування. При цьому стандарти пропонують різні моделі систем забезпечення якості як для конкретних ситуацій, так і для загального керівництва якістю на підприємствах. Відповідність системи якості постачальника вимогам стандартів ISO розглядається як певна гарантія здатності забезпечити стабільну якість продукції.

При достатньому рівні організації виробництва підприємство може використовувати один з відповідних стандартів ISO повністю без змін, що є найбільш оптимальним варіантом. У таких галузях, як авіакосмічна, атомна і інших, що мають складну специфікацію, неминуче використання національних стандартів. Однак при цьому національні стандарти не повинні суперечити міжнародним.

Вибір складових елементів системи якості залежить від виду продукції, що виробляється, умов ринкового попиту, характеру виробництва і потреби споживача. При цьому в контрактній ситуації споживач може вимагати, щоб певні елементи системи якості були основною частиною системи якості

постачальника.

Загалом, система якості являє собою організаційну структуру з чітким розподілом відповідальності з документальним поданням процедур, процесів і ресурсів (фахівців, обладнання, приладів), необхідних для здійснення загального керівництва якістю.

Ефективне використання системи якості досягається чітко визначеною політикою в області якості, що розробляється керівництвом підприємства і визначає цілі для реалізації таких елементів, які складають якість: відповідність призначенню, експлуатаційні характеристики, безпеку і надійність. Система якості є засобом, що забезпечує проведення політики і досягнення поставлених цілей. Вона повинна функціонувати таким чином, щоб забезпечувалася впевненість в тому, що:

- система розуміється правильно і ефективно;
- задовольняються вимоги споживача до продукції;
- проблеми, в тому числі поява дефектів, попереджаються, а не виявляються після виникнення.

Вплив системи якості поширюється на всі етапи життєдіяльності виробів. Ці етапи включають в себе:

- маркетинг, пошук і вивчення ринку (функціями маркетингу є визначення потреби в продукції, визначення вимог споживача і встановлення на постійній основі системи зворотного зв'язку);
- проектування та розробку продукції;
- матеріально-технічне постачання (повинно здійснюватися на основі програми якості поставок і тісних робочих контактів з кожним з постачальників);
- підготовку і розробку виробничих процесів (повинна проводитися з урахуванням того, що всі виробничі операції здійснюються в керованих умовах з письмовим оформленням правил у вигляді стандартів, перевірка якості повинна передбачатися в чутливих точках виробництва);
- виробництво (перевірка на кожному етапі повинна бути пов'язана



з відповідною документацією на готову продукцію, перевірка виробничих процесів повинна включати матеріали, обладнання, ЕОМ і програмне забезпечення, процедури і персонал);

➤ проведення контролю, випробувань і досліджень (процедури контролю та випробувань повинні бути оформлені документально, включаючи опис обладнання для контролю і стандарти, що регламентують якість виконання робіт при контролі);

- упаковку і зберігання;
- реалізацію і розподіл продукції;
- монтаж та експлуатацію;
- технічну допомогу та обслуговування;
- утилізацію після використання.

Сукупність цих етапів представляють у вигляді петлі якості, в принципі відповідної спіралі якості (рис. 1.3).

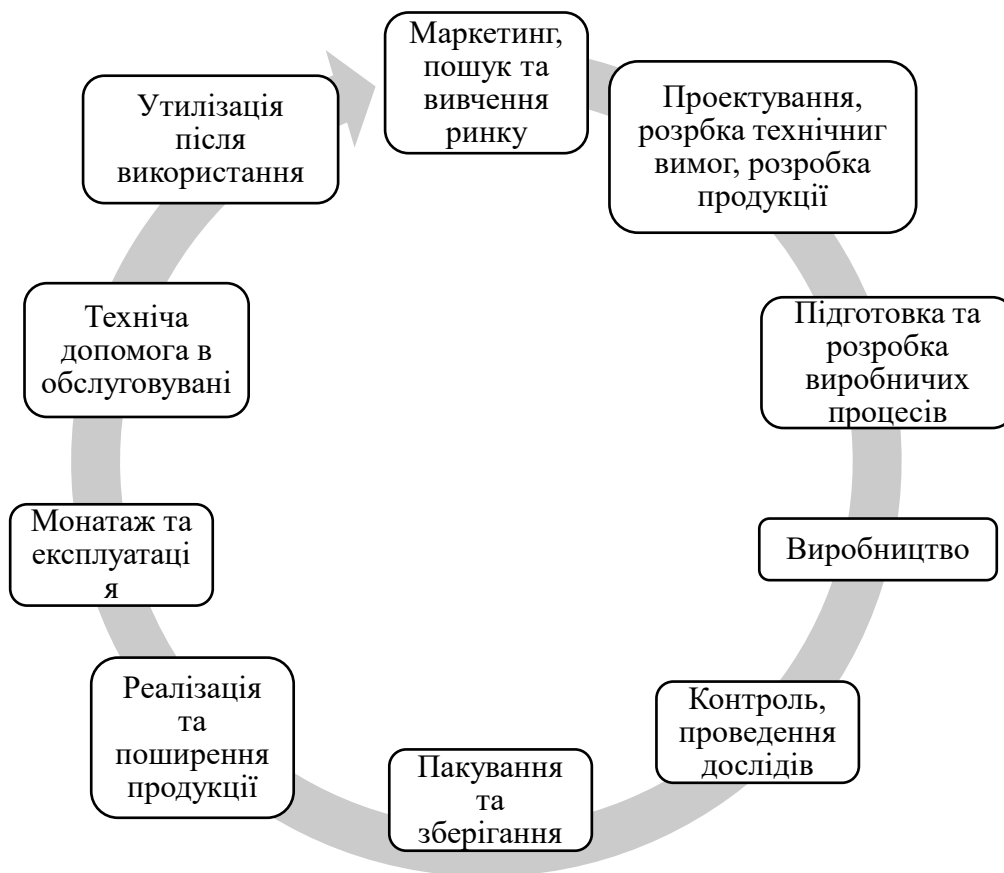


Рис. 1.3. Етапи впливу системи якості

Для успішного впровадження і функціонування системи якості розробляється в письмовому вигляді, і підтримується в робочому стані систематизована документація.

Крім політики в області якості і опису всіх процедур, систематизованих в певному порядку, в якості постійного довідкового матеріалу на підприємстві розробляється керівництво за якістю. На великих фірмах може бути «Загальне керівництво за якістю» і окремі «Настанови з якості» для різних підрозділів.

При освоєнні нових видів продукції розробляються програми якості, що визначають:

- цілі в області якості;
- конкретний розподіл прав і обов'язків на різних етапах робіт;
- застосування спеціальних процедур, методів та інструкцій;
- програми випробувань, контролю і перевірки по етапах;
- метод зміни програми якості в міру розвитку робіт.

Важливе місце в системі якості приділяється перевірці (технічному обслуговуванню) продукції. При цьому перевірці повинні підлягати закупівельні матеріали, комплектуючі деталі і вузли, що надходять на виробництво. Вибір методу контролю залежить від важливості впливу поставки на якість. Області перевірки і частота проведення перевірок виробництва залежать від значень характеристик і показників, а також зручності проведення перевірки на даній стадії виробництва.

Перевірка повинна, по можливості, проводитися в тих точках, де виникає контрольована характеристика продукції. Контроль може включати в себе проведення наступних перевірок:

- наладку і технічний контроль першої деталі;
- технічний контроль або випробування, що проводяться людиною;
- автоматичний технічний контроль або випробування;
- контроль в певних точках через певні інтервали протягом всього виробничого процесу;
- летучій контроль, що проводиться інспекторами, які відповідають

за виконання окремих операцій;

Для перевірки готової продукції використовують дві форми контролю готової продукції:

➤ приймальний контроль або випробування, які підтверджують відповідність одиниць або партії продукції експлуатаційним вимогам та іншим характеристикам якості (може виконуватися суцільна перевірка, контроль за партіями або безперервний контроль);

➤ перевірка якості готової до відправлення продукції методом вибіркового контролю.

Ці форми контролю готової продукції можуть бути використані для забезпечення швидкого зворотного зв'язку з метою коригування як продукції, так і виробничого процесу.

Гарантувати впевненість у правильності прийнятих рішень повинні постійні дії з управління контрольно-вимірювальними системами. У сферу управління входять калібри, інструменти, датчики, спеціальне випробувальне обладнання та прилади, відповідне програмне забезпечення (рис.1.4).

Процедури управління і здійснення самого процесу вимірювань встановлюються з використанням статистичного контролю. Похибки вимірювань повинні зіставлятися з заданими вимогами. Управління контрольно-вимірювальним та випробувальним обладнанням, а також методами випробувань включає в себе:

➤ відповідні технічні умови і задані параметри, в тому числі і межі вимірювань;

➤ забезпечення необхідної точності і градуювання;

➤ документальне підтвердження ідентифікації інструменту і приладів, частоти проведення калібрувань та її статусу;

➤ перевірку відповідності відомим стандартам точності і стабільності, переважно національним або міжнародним.

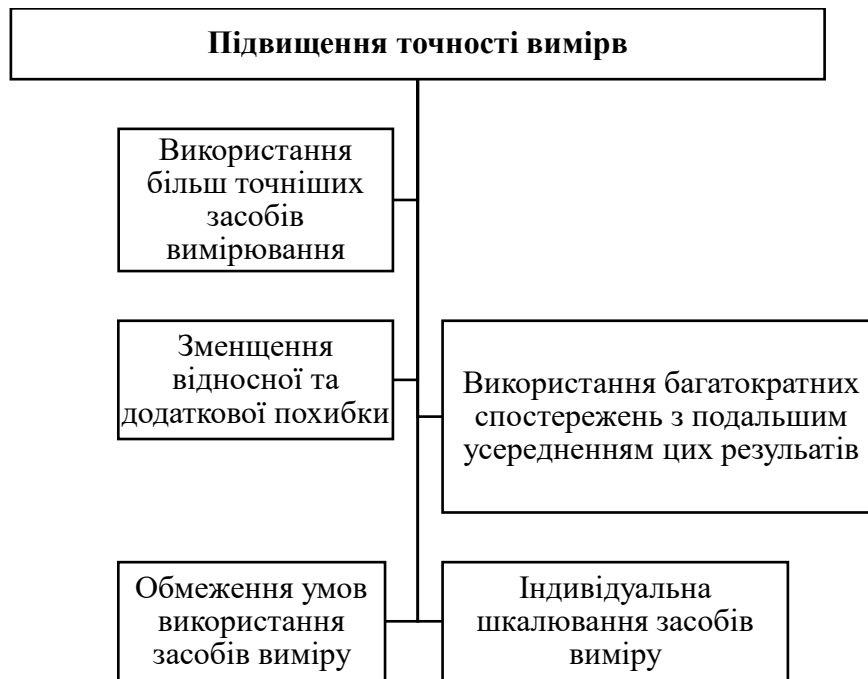


Рис. 1.4. Підвищення достовірності вимірювань

У разі невідповідності якості продукції встановленим вимогам, проводяться заходи коригуючого впливу, які передбачають усунення випадків повторного виникнення невідповідності, а також ремонт, переробку, повернення або відбраковування матеріалів або одиниць продукції незадовільної якості, з дослідженням взаємозв'язку між причиною і наслідком.

Основною документацією, використовуваною в процесі управління якістю, є: креслення, технічні умови, інструкції з технічного контролю, процедури проведення випробувань, робочі інструкції, операційні карти, «керівництво з якістю», операційні процедури, процедури забезпечення якості.

Реєстраційними документами з даними про якість можуть бути:

- карти реєстрації, які стосуються проектування, контролю, випробувань, аналізу, перевірці перегляду і т.д. ;
- протоколи технічного контролю;
- дані, отримані в результаті випробувань;
- звіти по оцінці достовірності;
- звіти про перевірки;

- звіти про періодичну перевірку матеріалів;
- дані калібрування;
- звіти про витрати на якість.

Система контролю якості, що застосовується в організації з технічного обслуговування (ремонт) авіаційної техніки повинна охоплювати всі засоби і процедури, які використовуються для забезпечення гарантії збереження льотної придатності при виконанні робіт, що впливають на льотну придатність повітряного судна, і якість робіт, безпосередньо не пов'язаних з льотною придатністю. При цьому передбачаються комплексні перевірки якості, в процесі яких перевіряються:

- дотримання програми технічного обслуговування і обов'язкових вимог до збереження льотної придатності;
- дотримання стандартних технічних вимог і правил виробника або організації;
- заходи запобігання і боротьби з корозією і інші процеси захисної обробки;
- заходи, що приймаються з метою перевірки всіх повітряних суден по завершенні на них робіт на предмет відсутності залишених інструментів.

Перевіркам підлягають правила зберігання деталей, вузлів, агрегатів, процедури видачі дозволів на експлуатацію, засоби технічного обслуговування для визначення адекватності обладнання, загальні правила організації контролю за збереженням льотної придатності.

### **1.3. Рівень якості, формування показників якості виробів авіаційної техніки**

Рівень якості - це відносна характеристика виробу, заснована на порівнянні сукупності показників якості з відповідною сукупністю базових показників.

При плануванні рівня якості новостворюваного об'єкта орієнтуються на кращі світові зразки, тобто досягнутий світовий рівень якості, також

вивчаються останні досягнення науки і техніки, вітчизняний і зарубіжний досвід створення різних видів машин і устаткування, які можуть служити аналогами або прототипами розроблюваних виробів. При розробці виробів повинно забезпечуватися прогнозування рівня техніки на перспективу, з урахуванням задоволення вимог споживачів.

Якість поверхні - це сукупність всіх службових властивостей поверхневого шару матеріалу. Якість поверхні грає виключно важливу роль в забезпеченні високих експлуатаційних показників виробів. Зовнішнім впливам, в першу чергу, піддаються поверхні виробів, при цьому знос поверхонь тертя, зародження тріщин і інші процеси протікають на поверхні виробу і в деякому прилеглому шарі.

Якість обробленої поверхні будь-яких матеріалів характеризується великою кількістю різних параметрів, які можна розділити на дві групи: фізико-хімічні та геометричні параметри, причому в залежності від властивостей матеріалу і методів обробки найбільш істотний вплив на експлуатаційні характеристики виробів надають ті чи інші з них.

В процесі виготовлення та експлуатації виробу на його поверхні виникають нерівності: в шарі матеріалу, що прилягає до неї, змінюються структура, хімічний склад. Нерівності на поверхні, структура і хімічний склад поверхневого шару змінюють фізико-хімічні та експлуатаційні властивості виробів. Поверхневий шар має суттєвий вплив на більшість експлуатаційних властивостей виробів: міцність, тертя і знос, діелектричні показники, вологопоглинання і т.д. Для композитів, що володіють специфічними властивостями, в першу чергу, через свою структуру, анізотропність, наявність армуючих елементів, механічна обробка часом досить істотно змінює властивості їх поверхневого шару, а отже, і експлуатаційні показники.

При механічній обробці композитів відбувається порушення цілісності поверхневого шару як за рахунок зняття наявного на поверхні відформованого виробу шару полімеризованого сполучного, що виконує захисну функцію від впливу зовнішніх факторів (наприклад, вологи), так і за рахунок перерізання

армуючих волокон.

Перерізання армуючих волокон при обробці різанням і такі процеси, як деструкція полімеру, призводять до зниження міцності виробів, причому це зниження досягає часом істотних величин (до 20 %). Це питання має важливе значення для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик, так як міцність в ряді випадків є основною експлуатаційною вимогою, наприклад, для оболонок з ПКМ, що знаходяться під внутрішнім тиском. Зниження міцності при обробці різанням позначається і при виготовленні спеціальних зразків для дослідження фізико-механічних характеристик виробів.

Перерізання армуючих волокон і зняття поверхневого шару полімеризованого сполучника інтенсифікує процес водопоглинання матеріалу. Характерною особливістю композитів є їх схильність до поглинання вологи, що призводить, в свою чергу, до зміни розмірів виробів і зниження їх фізико-механічних характеристик. Це в підсумку впливає на експлуатаційні показники. Встановлено, що після механічної обробки, особливо якщо обробку проводять із застосуванням ЗОР, водопоглинання матеріалу різко збільшується, що викликає часом необхідність для забезпечення необхідних експлуатаційних показників вводити додаткову операцію сушіння виробів після обробки.

При обробці різанням композитів за рахунок великих контактних майданчиків на задній поверхні інструменту і дії високих температур в зоні різання неминуче відбувається механо- і термодеструкція полімерного сполучного, а в таких матеріалах, як органопластики, де наповнювачем також є полімер, - і полімерного наповнювача. Наявність порушеного шару на поверхні обробленого виробу змінює його експлуатаційні показники, зокрема опір стирання, змінюють діелектричні показники матеріалу.

Вплив механічної обробки на показники якості поверхні виробів з композиційних матеріалів носить комплексний характер. Наприклад, шорсткість поверхні впливає як на водопоглинання і міцність, так і на інші показники якості (зносостійкість, аеродинамічні характеристики і т.д.).

Розробка і встановлення оптимальної номенклатури одиничних показників є одним з основних шляхів підвищення якості нової техніки. Для оцінки рівня якості використовують як сукупність відносних одиничних показників якості, так і комплексні показники.

Диференціальний (одиничний) показник  $q_i$  визначається за формулою:

$$q_i = \frac{P_i}{P_{i\delta}} \quad (1.1)$$

де  $P_i$  - значення  $i$ -го показника якості оцінюваної продукції;

$P_{i\delta}$  - значення  $i$ -го базового показника;

$i = 1, 2, \dots, n$  - кількість показників якості продукції.

З урахуванням різного вкладу одиничних показників в загальний рівень якості виробів встановлюють коефіцієнт вагомості кожного показника ( $m_i$ ) по конкретному виробу.

Інтегральний (комплексний) показник якості, який визначає рівень якості нового виробу з урахуванням коефіцієнтів вагомості  $m_i$

$$K = \left( \sum_{i=1}^n m_i q_i \right) / n, \quad (1.2)$$

Для такого представлення рівня якості впливає необхідність проведення кількісної оцінки всіх одиничних показників якості виробу, для якої використовуються математичні і експериментальні (фізичні) методи.

Фактичний рівень якості виробничого виробу авіаційної техніки буде залежати від певного числа організаційних чинників, таких як, наприклад, кваліфікація виконавців (робітників  $P$ ) досконалість технічної документації ( $N$ ) метрологічних характеристик приладів та обладнання ( $M$ ), і ін. Ці фактори можуть враховуватися у вигляді коефіцієнта якості  $K$ :

$$K = l - a_1(P) - a_2(N) - a_3(M) - \dots \quad (1.3)$$

де  $a, a_2, a_3, \dots$  - коефіцієнти пропорційності.

У всіх випадках при остаточній оцінці рівня якості пріоритет віддається оцінці якості споживачами. При цьому може проводитися бальна оцінка якості кожної з характеристик ( $K_i$ ), а також оцінка якості виробу в цілому ( $K_{cp}$ ):



$$K_i = a_i k_i, K_{cp} = \sum_{i=1}^n K_i \quad (1.4)$$

де  $a_i$ , - питома вага деякої  $i$ -ї характеристики;

$k_i$ - ступінь відповідності даної характеристики;

$i = 1, \dots, n$ - число характеристик.

Для визначення значень показників якості продукції використовують:

- експериментальної метод (на основі застосування технічних вимірювальних засобів, в тому числі неруйнівних методів контролю);
- розрахунковий метод (значення показників обчислюють за значеннями параметрів продукції, знайденим іншими методами при використанні відомих залежностей);
- метод опитувань (застосовують в органолептичній, соціологічній та експертній формах).

Визначальними показниками якості виробів є показники міцності матеріалів, з яких вони виготовлені. Якість виробів авіаційної техніки характеризується сукупністю великого числа комплексних і одиничних показників.

Основними показниками якості (рис. 1.5) виробів авіаційної техніки є:

- Показники призначення, що включають споживчі властивості (льотно-технічні, патентно-правові, естетичні та ін.);
- Показники надійності (безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність);
- Показники економічності і технологічності (виробничої, експлуатаційної, ремонтної);
- Показники, що визначають характер впливу на людей (безпека, нешкідливість, екологічний вплив, ергономічні характеристики).

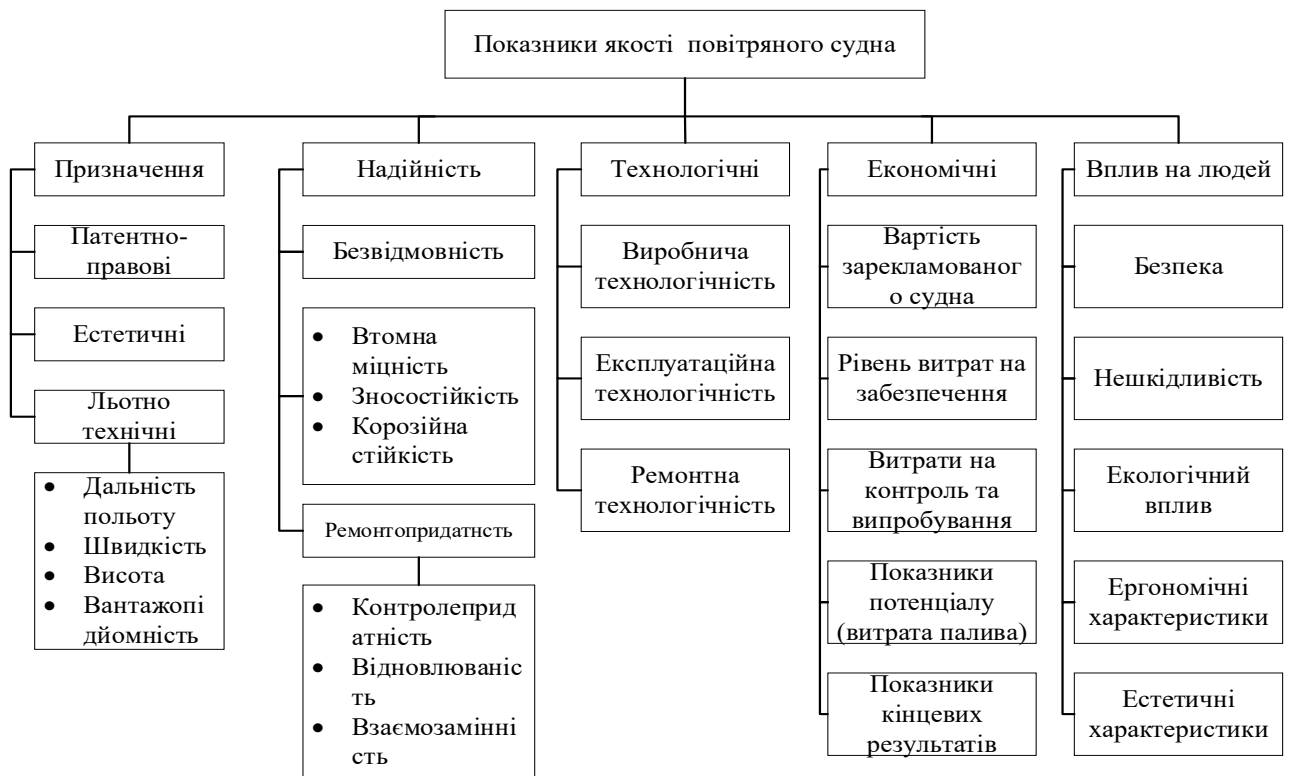


Рис.1.5. Класифікація показників якості виробів

В якості найбільш важливих кількісних показників якості типу повітряного судна використовуються показники, що відповідають вимогам льотної придатності. Міжнародною організацією цивільної авіації (ІКАО) розроблені спеціальні стандарти льотної придатності, відповідно до яких проектується повітряні судна. В експлуатації вирішуються завдання збереження льотної придатності з оцінкою живучості конструкції. При технічному обслуговуванні (ремонті) авіаційної техніки проводиться відновлення показників якості до рівня вимог льотної придатності.

#### 1.4. Моделі формування показників якості

У виробництві формування якості (встановлених показників) виробів авіаційної техніки відбувається з встановленням певної послідовності і черговості технологічних операцій. Кожна наступна операція все більше наближує формуючий показник якості до бажаного, при цьому мають

значення характеристики вихідних матеріалів, які також отримані за певною технологічною схемою. Значний внесок у формування показників якості вносять операції монтажу і збірки.

Для зручності аналізу процесу формування якості технологічний процес виготовлення продукції представляють у вигляді схеми (дерева етапів і рівнів формування показників якості).

Для окремих виробів процес формування показників якості може мати гребінчастий вид (рис 1.6, а.) При використанні цієї схеми технологічні процеси діляться на блоки, які охоплюють закінчені цикли виготовлення окремих частин даного виробу. Кожен з показників якості при цьому формується незалежно від інших. Забезпечення заданого значення показників якості в кожному технологічному блоці забезпечується певною черговістю технологічних операцій. У більшості випадків при виготовленні продукції в машинобудуванні, в тому числі і авіабудуванні, через дії на якість як планових, так і випадкових факторів має місце змішана схема формування заданих показників якості (рис. 1.6, б). При змішаній схемі блоки технологічних операцій охоплюють виготовлення спочатку деталей, потім вузлів, агрегатів, виробу в цілому.

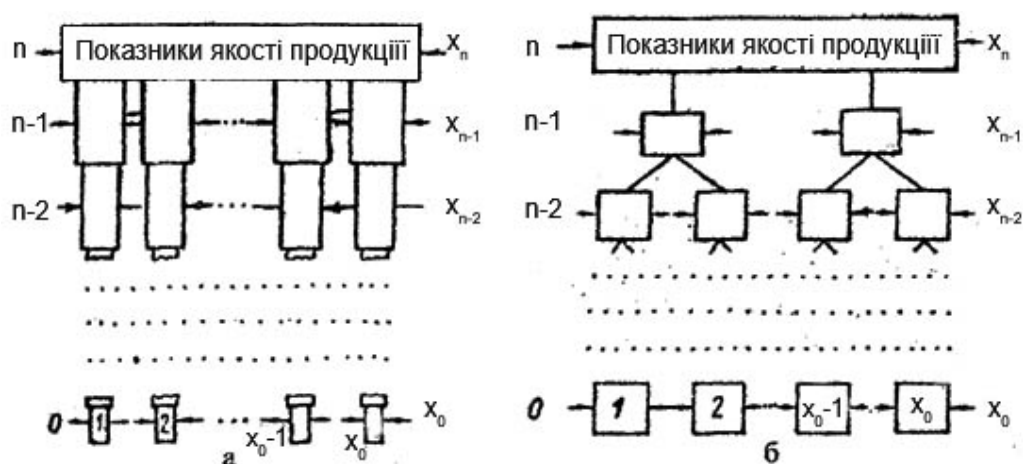


Рис.1.6. Моделювання показників якості: а – гребінчаста; б – змішана;  $n$  та  $x$  – відповідна кількість рівнів та етапів формування потрібного значення показників якості.



Рис. 1.7. Технологічна підготовка виробництва виробів із ПКМ



Рис. 1.8. Діаграма основних складових ТПВ для виробів із ПКМ

Такими блоками можуть бути підготовчі операції (рис.1.9), що включають формування, лиття, кування, пресування, прокатку; операції обробки деталей - термічна обробка, зварювання, механічна обробка; складальні і монтажні операції - обробка отворів, підгонка, постановка болтів і заклепок.

Імовірність забезпечення необхідного значення показників якості при незалежних технологічних операціях, можна представити у вигляді:

$$P_k = \prod_{i=1}^n P_i \quad (1.5)$$

де  $P_i$  - ймовірність якісного виконання  $i$ -ї операції;

$n$  - кількість операцій, що забезпечують задану якість.

Якщо після деяких операцій мають місце контрольні операції з імовірністю виявлення дефекту  $P_{д}$ , то ймовірність якісного виготовлення після  $i$ -ї операції:

$$P_{ik} = 1 - (1 - P_i)P_{д} \quad (1.6)$$

для  $j$ -го технологічного блока:

$$P_j = \prod_{i=1}^{n_j} [1 - (1 - P_i)P_{д}] \quad (1.7)$$

де  $n_j$  - кількість технологічних операцій, які становлять  $j$ -й блок.

Технологічні процеси (1.10) в різній мірі впливають на формування властивостей частин конструкцій, в об'ємі, на поверхні або в локальних зонах.

Найбільш широко застосовуються в літакобудуванні технологічні процеси і їх вплив на властивості частин конструкцій, зображено на рис. 1.9.

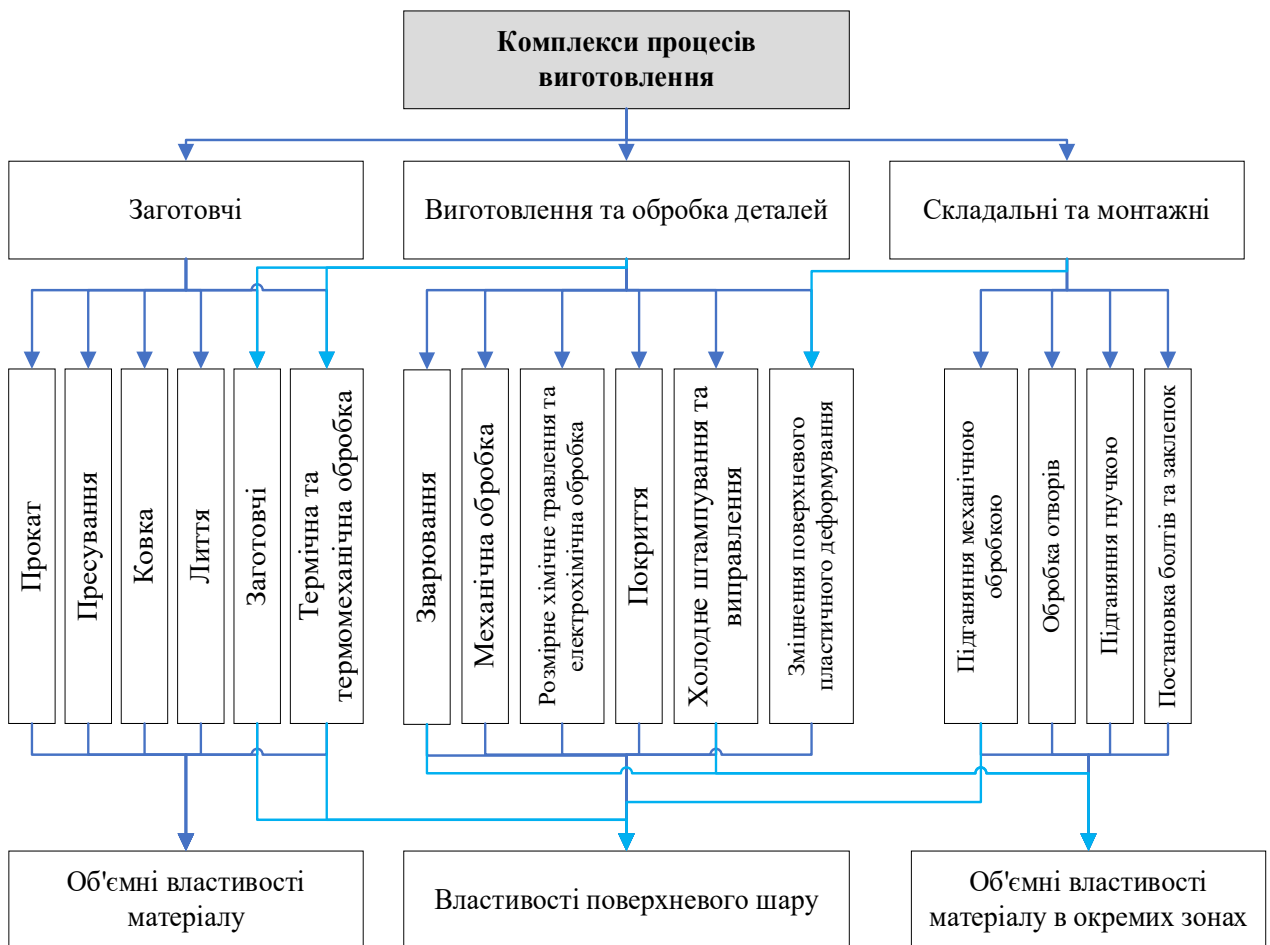


Рис.1.9. Схема основних процесів технології літакобудування та схеми впливу на властивості частин конструкцій

Для перевірки якості вхідних матеріалів і комплектуючих виробів на підприємствах існує вхідний контроль. В процесі виготовлення виробів піддається також контрольними операціями.

Надійність контролю залежить від застосовуваних методів і засобів контролю, обумовлюється режимами контролю та характером впливу зовнішніх факторів.

### **1.5. Виявлення і аналіз чинників, що впливають на якість виробів**

У підвищенні якості продукції, що випускається, велике значення має аналіз причин появи дефектів і розробка заходів щодо їх усунення.

При вирішенні завдань управління якістю проводять аналіз чинників якості на кожному етапі виготовлення виробів. Так, наприклад, фактор якості вихідних матеріалів і заготовок  $\Phi_{\text{имз}}$  визначається рівнем вхідного контролю заготовок ( $\text{П}_{\text{вкз}}$ ); вибором квалітетів бази заготовок ( $\text{П}_{\text{вкб}}$ ); установкою заготовок в обладнанні і пристроях ( $\text{П}_{\text{узо}}$ ):

$$\Phi_{\text{имз}} = \text{П}_{\text{скз}} + \text{П}_{\text{вкб}} + \text{П}_{\text{узо}}. \quad (1.8)$$

Фактор якості технологічного процесу обробки деталі  $\Phi_{\text{тпо}}$  залежить від конструкторської документації  $\text{П}_{\text{кд}}$ , вибору обладнання, пристроїв та інструменту  $\text{П}_{\text{воп}}$  технології обробки деталі  $\text{П}_{\text{тод}}$ , технології контролю деталі  $\text{П}_{\text{ткд}}$ , досвіду конструкторів і технологів  $\text{П}_{\text{окт}}$

$$\Phi_{\text{тпо}} = \text{П}_{\text{кд}} + \text{П}_{\text{воп}} + \text{П}_{\text{тод}} + \text{П}_{\text{ткд}} + \text{П}_{\text{окт}} \quad (1.9)$$

Фактор якості рівня контролю деталей  $\Phi_{\text{укд}}$  визначається повнотою контрольованих характеристик деталей в конструкторсько-технологічній документації  $\text{П}_{\text{пкх}}$ , рівнем контролю деталей  $\text{П}_{\text{укд}}$ , станом контрольованих вимірювальних приладів  $\text{П}_{\text{скп}}$ , досвіду контролерів  $\text{П}_{\text{ок}}$ :

$$\Phi_{\text{укд}} = \text{П}_{\text{пкх}} + \text{П}_{\text{укд}} + \text{П}_{\text{скп}} + \text{П}_{\text{ок}} \quad (1.10)$$

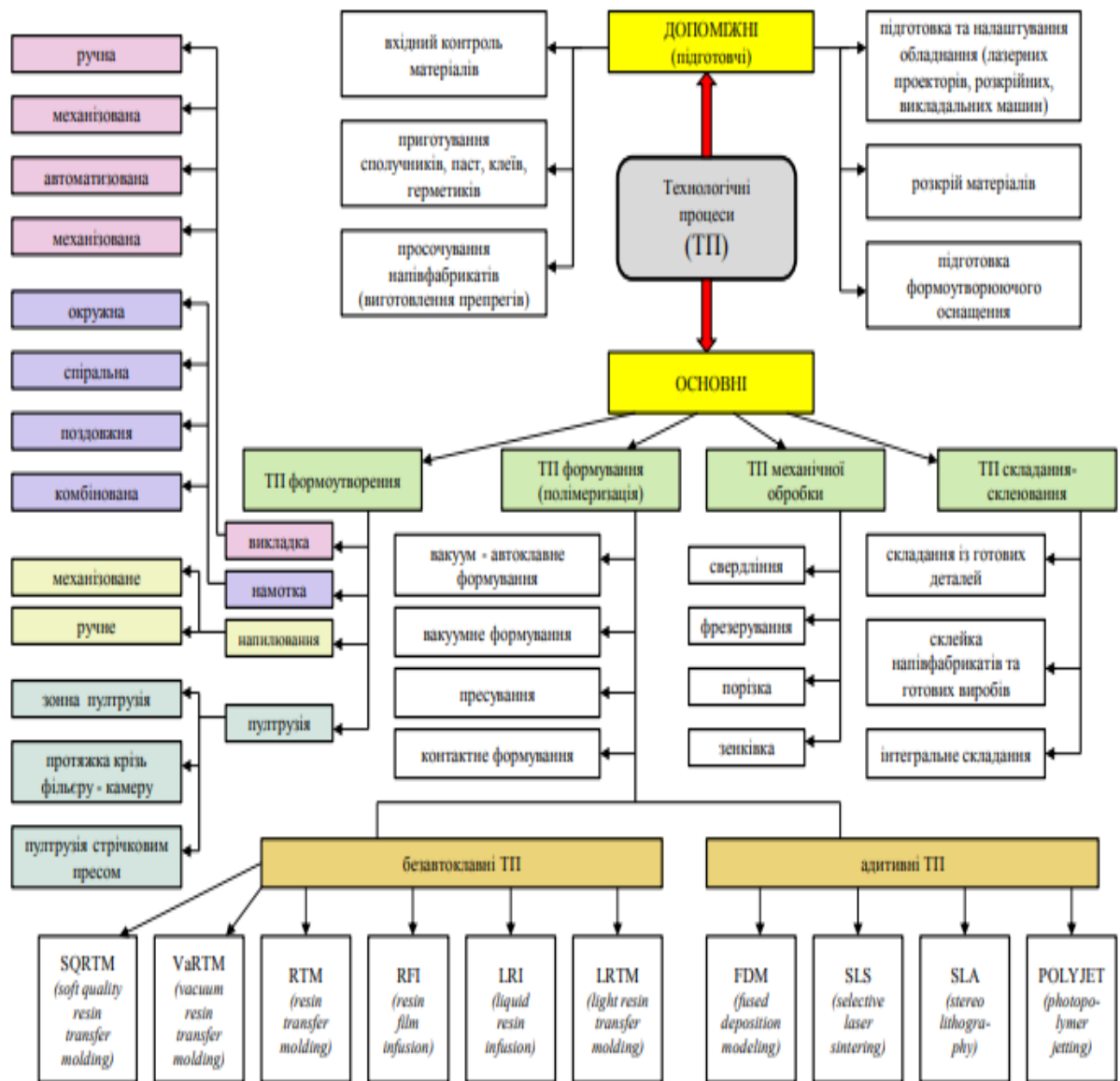


Рис. 1.10. Схема загальної дворівневої класифікації технологічного процесу для виробів із ПКМ

Якість виконання складання виробу визначається станом і сумісністю з'єднання деталей, які збираються, з пристосуванням, оснащенням і інструментом, зазорами і натягами зібраних деталей і складальних одиниць при обраному технологічному базуванні, станом засобів вимірювання зазорів і взаємного розташування деталей, досвідом збирачів.

Фактор якості контролю збірки  $\Phi_{ПКС}$  визначається обраним технологічним процесом складання  $\Pi_{ВП}$ , обраними картами контролю  $\Pi_{ВКК}$ , станом складального обладнання, оснащення, контрольних пристосувань  $\Pi_{СОК}$ ,

станом засобів контролю  $P_{\text{ССК}}$ , досвідом контролера  $P_{\text{ОК}}$ , станом активного контролю збірки  $P_{\text{АКС}}$ :

$$\Phi_{\text{ПКС}} = P_{\text{ВТП}} + P_{\text{ВКК}} + P_{\text{СОК}} + P_{\text{ССК}} + P_{\text{ОК}} + P_{\text{АКС}} \quad (1.11)$$

Первинна інформація про дефекти може бути зібрана у вигляді контрольних карт або опитувальних листів, відомості з яких дозволяють виявити вид розподілу випадкових факторів, виявити причини порушень. Для встановлення найбільш важливих факторів, на яких необхідно зосередити першочергову увагу, використовують метод порівняння. Для цього використовують спеціальні графіки (діаграми) видів дефектів (браку), на яких наводяться всі випадки браку з причин невідповідності сировини і матеріалів, обробки, документації і т.д. (рис 11, а), а також види дефектів - тріщини, пори, включення, розшарування (рис 11, б). Діаграми дають можливість об'єктивно порівнювати види порушень виробничого процесу або процесу використання і намітити послідовність заходів щодо їх вдосконалення та зміни.

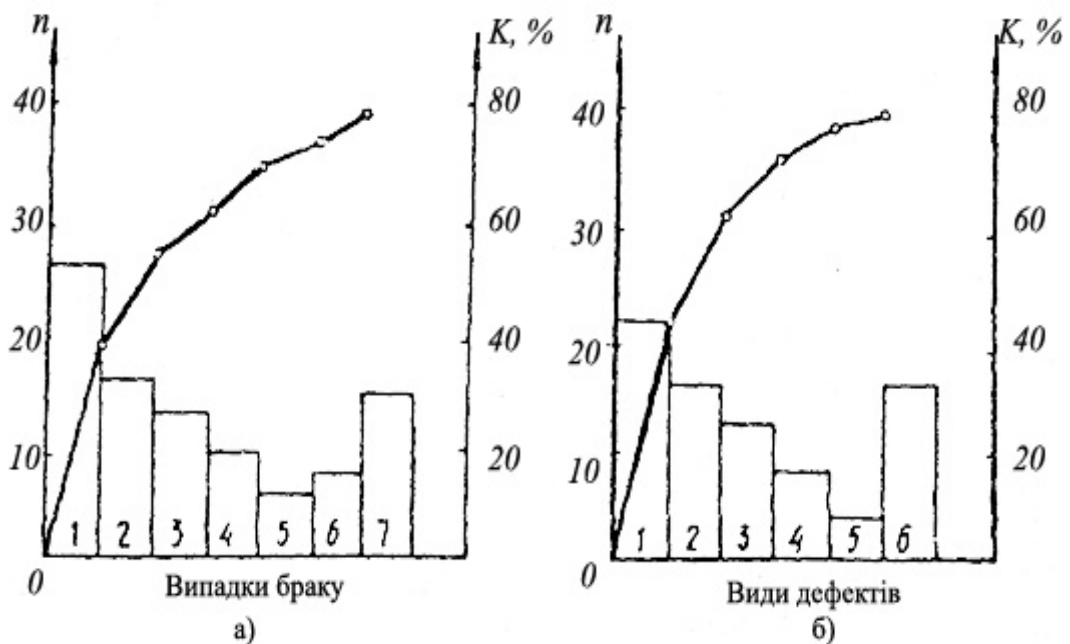


Рис. 1.11. Зображено діаграму видів браку:  $n$  – кількість випадків браку;  $K$  – накопичений відсоток випадків браку; а – випадки браку: 1 - сировини та матеріалів; 2 – комплекти виробів; 3 – оздоблення; 4 – відхилення від розмірів; 5 – документація; 6 – обробка; 7 – інші види браку; б – види недопустимих дефектів: 1 – тріщини; 2 – підрізи; 3 – усадкові раковини; 4 –



пори; 5 – неметалічні включення; 6 – розшарування.

Дослідження потоку виявлених дефектів в процесі виробництва дозволяє визначити їх основні характеристики і принципи утворення.

Для моделювання потоку дефектів приймають такі припущення:

- поява дефекту на кожній технологічній операції є випадковою подією з постійною ймовірністю появи;
- ймовірність появи дефекту на одних деталях не залежить від ймовірності появи дефекту на інших;
- при виконанні однієї технологічної операції може з'явитися тільки один дефект;
- ймовірність появи дефекту при одній технологічній операції на одній деталі значно менше одиниці.

Тоді потік дефектів може бути представлений розподілом Пуассона:

$$P_k = \frac{(nP_0)^k}{k!} \cdot e^{-P_0}, \quad (1.12)$$

де  $n$  - кількість виготовлених деталей або повторень виконуваної операції;  $P_0$  - ймовірність появи дефекту при виконанні однієї технологічної операції;  $k$  - кількість виниклих дефектів.

Ймовірність виявлення дефекту не завжди дорівнює одиниці, так як контроль здійснюється не для всіх дефектних ситуацій. Тому ймовірність виявлення дефекту  $P_{Kz}$ , при  $z$ -ї контрольній операції буде дорівнює добутку коефіцієнта охоплення  $K_{oz}$  контрольних місць можливих дефектних ситуацій на коефіцієнт надійності контролю  $K_{HZ}$  :

$$P_{Kz} = K_{oz} + K_{HZ} \quad (1.13)$$

де  $0 < K_{HZ} < 1$ .

Коефіцієнт надійності контролю залежить від застосовуваних методів і засобів контролю, обумовлюється режимами контролю та характером впливу зовнішніх факторів.

## **Висновки до розділу 1**

Проведено аналіз якості композитних матеріалів авіаційної техніки та розглянуто вимоги, які пред'являються до якості виробів на виробництві. Проаналізовано життєвий цикл авіаційних конструкцій із ПКМ та використання політик систем якості які розробляються керівниками підприємства .

Розглянуто основні моделі показників якості процесів технологій літакобудування, розглянута класифікація та діаграма видів браку композитних матеріалів в процесі виробництва.

## РОЗДІЛ 2

### АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ ТА МЕТОДІВ ОЦІНКИ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ В АВІАБУДУВАННІ

#### 2.1 Огляд діючих нормативних документів в сфері композитних матеріалів

Розглянемо основні нормативні документи (табл.1) які відносяться до виготовлення деталей з композитних матеріалів в різних галузях промисловості та основні вимоги до них.

Таблиця 2.1

Аналіз стандартів ASTM для оцінки міцнісних характеристик композиційних матеріалів

Метод	Мета випробувань	Процедура тестування	Результати тестування
Випробування на розтяг композитних матеріалів ASTM D3039	Використовується для вимірювання сили, необхідної для розриву зразка полімерного композиту, і ступеня, до якого зразок розтягується або подовжується до точки розриву.	Зразки поміщають в ручки універсальної випробувальної машини на певній відстані між рукоятками і витягують до руйнування. Швидкість випробування може бути визначена специфікацією матеріалу або часом до відмови (від 1 до 10 хвилин). Типова швидкість випробування стандартних зразків становить 2 мм/хв. Для визначення подовження та модуля пружності при розтягуванні використовується тензодатчик. Залежно від армування та типу може знадобитися випробування в кількох напрямках.	Діаграма напруження-деформація. Міцність на розрив (МПа). Модуль пружності по хорді розтягування (МПа). Деформація розтягування (%). Коефіцієнт Пуассона.
Міцність на розрив сендвіч-конструкцій ASTM C297	Інформація про стабільність з'єднання серцевини з поверхнею, передачу навантаження та міцність на розтягування в плоскому положенні сендвіч-серцевини стільникових КМ.	Випробувальні зразки вирізають із сендвіч-панелей, а грані випробувальних зразків скріплюють з алюмінієвими блоками. Один з алюмінієвих блоків монтується в пристосуванні на нерухомій стороні універсальної випробувальної машини, протилежний алюмінієвий блок монтується в пристосуванні на рухомій стороні універсальної випробувальної машини. Потім вузол переміщують зі швидкістю 0,50 мм/хв до руйнування або зі швидкістю, налаштованою на руйнування протягом 3...6 хвилин.	Гранична міцність на розтягнення в плоскому стані, МПа. Коєзійна недостатність клею, що облицьовує серцевину. Порухення адгезії клею, що облицьовує серцевину. Дефекти при розтягуванні.

Метод	Мета випробувань	Процедура тестування	Результати тестування
Розтягнення з відкритим отвором ASTM D5766	Вимірює силу, необхідну для розриву зразка полімерного композитного ламінату з центральним отвором. Використовується в аерокосмічній промисловості, коли є технологічна необхідність створення отворів для кріплення КМ.	Зразки для випробувань поміщають в ручки універсального випробувального приладу на певній відстані між ручками і витягують до руйнування. Випробувальні зразки та протокол випробувань відповідають стандарту ASTM D3039. ASTM D5766 описує підготовку отвору.	Межа міцності на розрив у відкритому отворі (з насічкою) вказується в МПа і дорівнює максимальній силі, яку витримує випробувальний зразок до руйнування, поділений на площу загального поперечного перерізу. Можливість оцінки типу пошкодження ламінату в отворі.

Випробування на розтяг використовується для вимірювання сили, необхідної для розриву зразка полімерного композиту, і ступеня, до якого зразок розтягується або продовжується до точки розриву. Випробування дають діаграму напруження-деформації, яка використовується для визначення модуля розтягування. Дані часто використовують для визначення матеріалу, для проектування деталей, які витримують зусилля, а також для перевірки якості матеріалів. Тому розглянуто також основні державні стандарти України.

ДСТУ EN ISO 527-5:2018 «Пластмаси. Визначення властивостей під час розтягування. Частина 5. Умови випробування односпрямованих волокнистих пластмасових композитів». В стандарті описані умови випробування для визначення властивостей під час розтягування односпрямованих волокнистих пластмасових композитів на основі загальних принципів, наведених в ISO 527-1, який встановлює загальні принципи для визначення властивостей під час

розтягування пластмас і пластмасових композитів за певних умов. Методи випробування поширюється на всі полімерні матричні системи, армовані односпрямованими волокнами, які відповідають вимогам, охоплюючи характер розривів, викладених у цьому стандарті.

ДСТУ 2241-93 «Матеріали композитні. Склопластики. Терміни та визначення», ДСТУ 2242-93 «Склопластики конструкційні. Типи, технологія, властивості. Терміни та визначення», ДСТУ 2243-93 «Склопластики радіотехнічного призначення. Типи, технологія, властивості. Терміни та визначення» Стандарти встановлюють терміни та визначення основних понять у галузі склопластиків, їх видів та компонентів. Терміни, встановлені цим стандартом, обов'язкові для використання в усіх видах документації, науково-технічній, навчальній та довідковій літературі.

В стандартах ДСТУ 2931-94 «Конструкції склопластикові. Антени параболічні. Відбивачі. Загальні технічні умови. ДСТУ 2932-94 «Конструкції склопластикові. Укриття антенних пристроїв радіопрозорі. Загальні технічні умови», ДСТУ 2933-94 «Конструкції склопластикові. Укриття антенних пристроїв радіопрозорі. Панелі. Загальні технічні умови» описані основні вимоги до склопластикових конструкцій.

ДСТУ 9065:2021 «Арматура композитна для армування бетонних конструкцій. Загальні технічні умови». Стандарт встановлює загальні технічні умови на арматуру композитну для армування бетонних конструкцій гладкого та періодичного профілю зі скляних, базальтових, вуглецевих і арамідних поздовжніх односпрямованих волокон (або їх поєднання), пов'язаних просоченим, а потім затверділим, термореактивним сполучником на основі синтетичних (епоксидних, поліфінних) смол у вигляді стрижнів та решіток, призначену для армування звичайних і попередньо напружених бетонних конструкцій та елементів, що експлуатуються в середовищах з різним ступенем агресивного впливу та відповідають вимогам вогнестійкості та пожежної безпеки згідно з ДБН В.1.1-7.

ДСТУ ISO 10406-1:2021 «Арматура композитна. Методи випробування.

Частина 1. Стрижні та решітки» стандарт визначає методи випробування, застосовані до стрижнів і решіток з арматури композитної як арматури чи попередньо напружених пучків у бетоні.

ДСТУ EN ISO 14125:2019 «Склопластикові композиційні матеріали. Визначення гнучкості» Цей стандарт встановлює метод визначення властивостей на згин армованих волокном пластикових композитів під триточковим (метод А) та чотириточковим (метод В) навантаженням. Визначено стандартні зразки для випробувань, але включено параметри для альтернативних розмірів зразків для використання, де це необхідно. Включено діапазон тестових швидкостей.

ДСТУ EN ISO 9712:2014 «Неруйнуючий контроль. «Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю» стандарт встановлює вимоги до кваліфікації та сертифікації персоналу, який здійснює неруйнівний контроль.

ДСТУ EN 4179:2017 «Аерокосмічна серія. Кваліфікація і атестація персоналу для неруйнівного контролю

## **2.2. Методи контролю якості композиційних матеріалів на етапі виробництва**

Неруйнівний контроль (НК) - галузь науки і техніки, що охоплює дослідження фізичних принципів, розробку, вдосконалення і застосування методів, засобів і технологій технічного контролю об'єктів, які не руйнують і не погіршують їх придатність до експлуатації.

Неруйнівний контроль використовується в автомобілебудуванні, в авіабудуванні, суднобудуванні, на промислових підприємствах та будівництві. НК існує на всіх етапах в виробництві та експлуатації продукції. Контроль може бути суцільності, розмірів та структури матеріалів або виробів.

Неруйнівний контроль, в залежності від фізичних явищ, покладених в його основу відповідно до ДСТУ EN ISO 9712:2014 та ДСТУ EN 4179:2017 підрозділяється на:

- акустико-емісійний контроль (АТ);
- вихрострумний контроль (ЕТ);
- інфрачервоний термографічний контроль (ТТ);
- течешування (ЛТ);
- магнітопорошковий контроль (МТ);
- радіографічний контроль (РТ);
- контроль напружених станів (СТ),
- ультразвуковий контроль (УТ),
- візуальний контроль (ВТ).

Розглянемо ті методи НК які використовуються на практиці для контролю виробів з композитних матеріалів.

Візуальний метод (ВТ) неруйнівного контролю базується на спостереженні і аналізі параметрів оптичного випромінювання, що взаємодіє з контрольованим об'єктом. При візуальному контролі вимірюваною характеристикою є зміна інтенсивності світла. Візуально контролюють вихідні матеріали, напівфабрикати, готову продукцію, виявляють відхилення форми і розмірів валиків зварних швів, вади матеріалу і обробки, поверхневі дефекти. Однак можливості очей обмежені, і тому застосовують оптичні прилади (рис.2.1) такі як лупи, ендоскопи, мікроскопи, які дозволяють розширити межі можливостей людського ока. Візуальний контроль із застосуванням оптичних приладів називають візуальнооптичним. Він полягає у використанні явища відображення видимого світла від досліджуваного об'єкта. Візуальний метод НК являється одним із головних методів контролю.



Рис. 2.1. Набір інструментів для візуального контролю механічних пошкоджень (ліворуч) та оптичні прилади б)

Магнітний метод (МТ) неруйнівного контролю, поверхневий і під поверхневий метод контролю, заснований на реєстрації магнітних полів розсіювання, що виникають над дефектами або на визначенні магнітних властивостей контрольованих виробів. Його застосовують, як правило, для контролю об'єктів, виконаних з феромагнітних матеріалів. При цьому методі в усіх випадках використовують намагнічуючі об'єкти (рис.2.2. а) і вимірюють параметри, які використовуються при контролі магнітними методами.

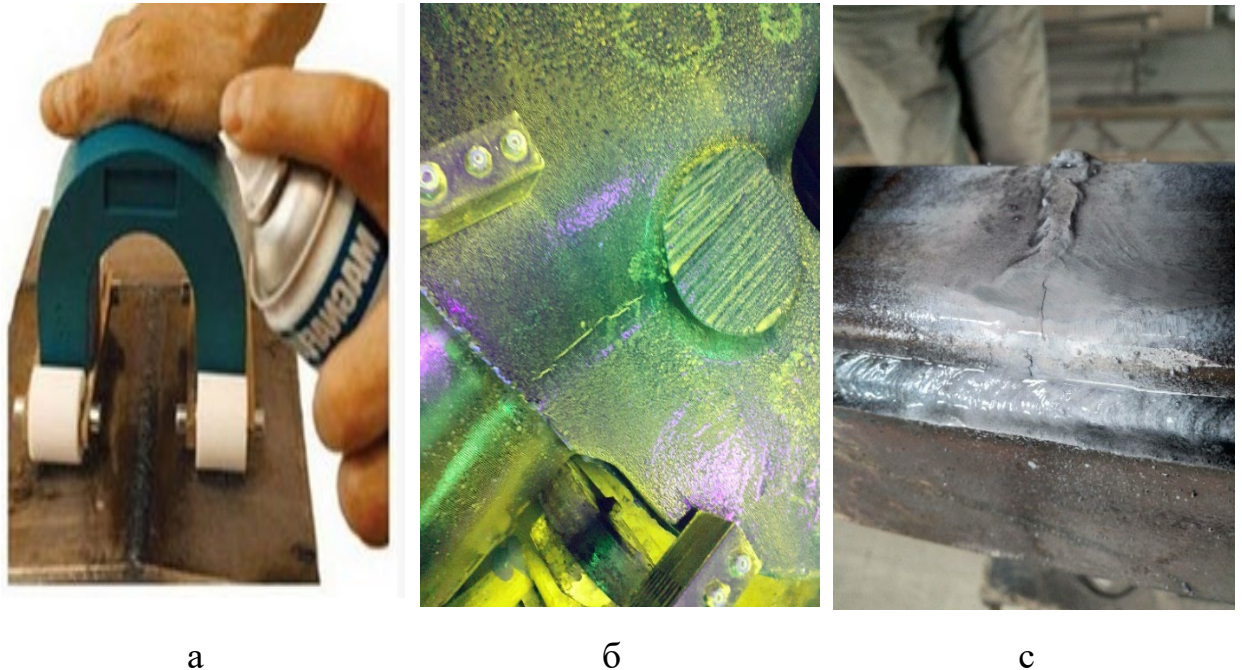


Рис. 2.2. Магнітний дефектоскоп (а) та вигляд дефекту магнітопорошковим методом контролю (б, с)

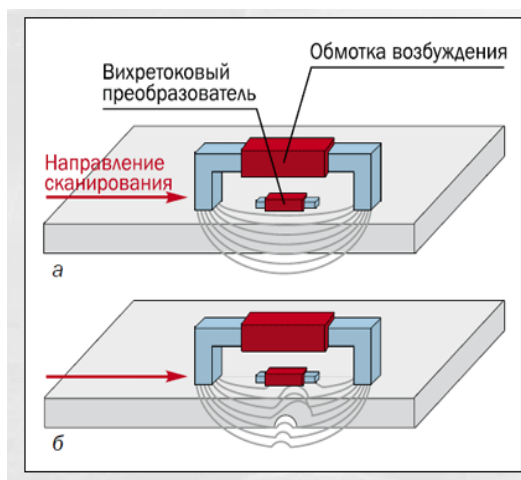
Капілярний метод (РТ) неруйнівного контролю, поверхневий метод основний принцип засновано на капілярному проникненні в порожнину дефекту контрольованих об'єктів пробних речовин, зокрема, індикаторної рідини, яка добре змочує матеріал виробу. Їх застосовують для виявлення слабо видимих неозброєним оком поверхневих дефектів у виробках будь-яких матеріалів.. У порожнину дефекту пробна речовина проникає під дією або різниці тисків, або капілярних сил. Реєстрація проникаючої пробної речовини фіксується певним чином із зовнішнього боку виробу. Зображено на рис. 2,3 приклади лінійних дефектів капілярного методу НК.





Рис.2.3. Вигляд лінійних індикацій капілярного методу контролю

Вихрострумний метод (електромагнітний метод) неруйнівного контролю заснований на реєстрації і аналізі взаємодії електромагнітного поля перетворювача з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться в контрольованому об'єкті (рис.2.4. а). Цим методом контролюють вироби з електропровідних матеріалів. Вихрострумні методи дозволяють вирішувати завдання контролю розмірів виробів. Цими методами вимірюють діаметр дроту, прутків і труб, товщину металевих листів і стінок труб при односторонньому доступі до об'єкта, товщину електропровідних (наприклад, гальванічних) і діелектричних (наприклад, лакофарбових) покриттів на електропровідних підставах, товщину шарів багатшарових структур, що містять електропровідні шари. Вимірювані товщини можуть змінюватися в межах від мікрометрів до десятків міліметрів.



а

б

Рис. 2.4. Зображено фізичний принцип роботи ВСП (а) та вигляд дефекту на екрані дефектоскопу (б)

Метод теплового контролю (ТТ) заснований на дистанційному вимірюванні та реєстрації температурних полів зовнішніх поверхонь елементів електрообладнання, апаратів і пристроїв, які знаходяться в експлуатації під робочою напругою (рис.2.5). За допомогою даного методу можна вирішувати наступні задачі:

- шляхом перерахунку вимірних перепадів температур оцінити стан обстежуваного об'єкта, виявити виникаючі в ньому дефекти і визначити ступінь їх розвитку;
- виявити термічно неоднорідні ділянки огорожувальних конструкцій і, шляхом зіставлення з проектними даними, ідентифікувати причину їх виникнення;
- проводити огляд об'єктів в інфрачервоному діапазоні спектра («теплова картинка»), вимірювання температури в будь-якій їх точці, спостереження динаміки теплових процесів, а також створити банк даних теплового стану по кожному із спостережуваних об'єктів;
- проводити обстеження котелень і теплових станцій - виявляти теплові витоки, дефекти і температуру в будь-якій точці зображення, отримувати термограми обладнання і трубопроводів;
- визначати дефекти цегляної кладки і футеровки котлів, проводити моніторинг, тестування і налагодження режимів горіння котлів, печей;
- здійснювати контроль якості ізоляції і герметичності виробів, виявляти ділянки вологи в конструкції;
- проводити випробування огорожувальних конструкцій будівель з різними температурно-вологісними умовами.

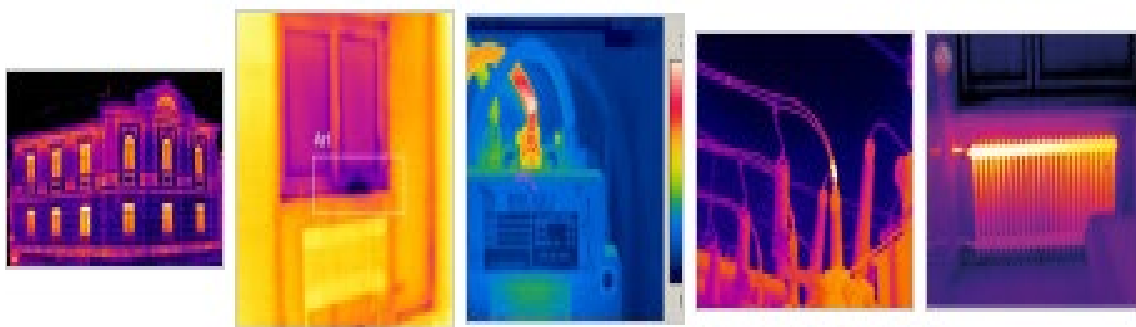


Рис. 2.5. Вигляд результатів теплового контролю

Метод застосовується до об'єктів з будь-яких матеріалів. За характером взаємодії поля з об'єктом контролю розрізняють методи: пасивний або власного випромінювання (на об'єкт не впливають зовнішнім джерелом енергії) і активний (об'єкт нагрівають або охолоджують від зовнішнього джерела). Вимірюваним інформаційним параметром служить температура або тепловий потік.

Радіаційний метод (РТ) неруйнівного контролю базується на реєстрації і аналізі проникаючого через об'єкт іонізуючого випромінювання. Інформативною ознакою методу є ослаблення інтенсивності іонізуючого випромінювання (рис.2.6). Цей метод можна застосовувати до будь-яких матеріалів і дозволяє визначити не тільки макродефекти, а також мікроструктуру металів або не металі.

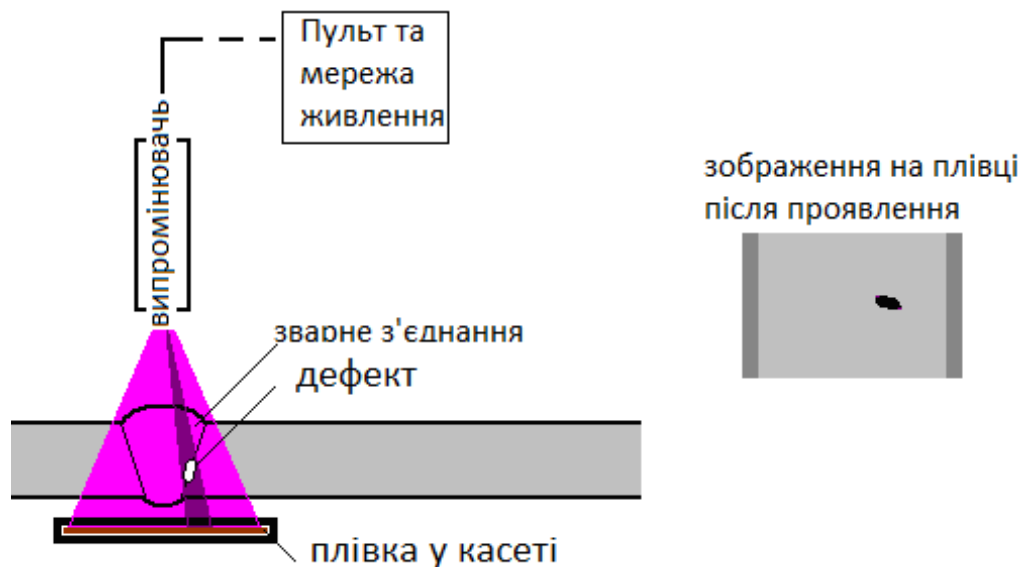


Рис. 2.6. Схема радіографічного методу НК

Акустичний метод (АТ) неруйнівного контролю полягає в реєстрації параметрів пружних хвиль, порушуваних або виникаючих в об'єктах. Найчастіше використовують пружні хвилі ультразвукового діапазону (з частотою коливань  $f > 20$  кГц). Цей метод називають ще ультразвуковим. До акустичних методів відноситься акустична емісія, коли в виробі виникають пружні коливання внаслідок перебудови структури, зародження і розвитку дефектів, корозійного розтріскування, пластичного деформування і ін. Залежно від виду акустичного методу інформативними ознаками є амплітуда,

фаза, час поширення, число імпульсів, амплітудно-частотний спектр, щільність сигналів і ін.

Акустичні методи неруйнівного контролю вирішують такі контрольні-вимірні завдання:

- метод проходженого випромінювання виявляє глибинні дефекти типу порушення цілісності, розшарування, непроклеї, непропаї;
- метод відбитого випромінювання виявляє дефекти типу порушення цілісності, визначає їх координати, розміри, орієнтацію шляхом прозвучування виробу і прийому відбитого від дефекту луна-сигналу;
- резонансний метод застосовується в основному для вимірювання товщини виробу (іноді застосовують для виявлення зони корозійного ураження, непропаїв, розшарувань в тонких місцях з металів);
- акустико-емісійний метод виявляє і реєструє тільки розвиваючі тріщини або ті, які здатні до розвитку під дією механічного навантаження (кваліфікує дефекти не за розмірами, а за ступенем їх небезпеки під час експлуатації), метод має високу чутливість до зростання дефектів - виявляє збільшення тріщини на 1 - 10 мкм;
- імпедансний метод призначений для контролю клейових, зварних і паяних з'єднань, що мають тонку обшивку, приклеєну або припаяну до елементів жорсткості;
- метод вільних коливань застосовується для виявлення глибинних дефектів.

### **2.3 Критерії оцінки методами неруйнівного контролю**

Залежно від місця розташування можливих дефектів їх можна умовно поділити на:

- поверхневі;
- підповерхневі з глибиною від 0,5 до 1,0 мм;
- внутрішні з глибиною залягання більше 1,0 мм.

Для виявлення поверхневих дефектів на практиці застосовуються як

правило візуальнооптичний, магнітопорошковий та капілярний методи НК. Для виявлення підповерхневих дефектів ефективні методи вважаються, вихрострумний, магнітопорошковий, а внутрішніх дефектів - методи ультразвуковий і радіографічний методи НК.

В таблиці 2.2 показане основне застосування методів НК для композитних матеріалів. При виборі методу НК деталі або вузла завжди необхідно враховувати характер або вид передбачуваного дефекту і його розташування, чутливість можливого методу контролю, умови роботи деталі і технічні умови на виріб, матеріал деталі, стан поверхні, форму і розмір деталі, зони передбачуваного контролю, доступність деталі і сумісність передбачуваного методу НК і т. д.

Таблиця 2.2.

Застосування методів НК протягом життєвого циклу композитних матеріалів з полімерною матрицею

Метод НК	Розробка і оптимізація виробу та процесу	Технологічний контроль в режимі реального часу	Контроль після виготовлення	Технічний контроль в процесі експлуатації
Акустична емісія	X	X	X	X
Випробування на герметичність	X	X	-	X
Рентгенографічна дефектоскопія і радіоскопія	X	X	X	X
Шерографія	X	X	X	X
Вимірювання деформації	-	-	X	-
Термографія	-	-	X	X
Ультразвуковий контроль	X	X	X	X
Візуальний контроль	X	X	X	X

В залежності від походження дефекти розрізняються розмірами, формою і середовищем, що заповнює їх порожнини. Так, наприклад, тріщини мають протяжну форму, різні розкриття і глибину. У порожнині тріщин

можуть бути оксиди, мастило, нагар і інші забруднення. Для тріщин характерні різкі обриси, гострі кути, а неметалеві включення, часто бувають округлої форми. Тому, з огляду на особливості і несучільності матеріалу, які необхідно виявити, вибирають метод НК для його надійного виявлення. Так, для виявлення поверхневих тріщин з малою шириною розкриття (0,5 - 5 мкм) на деталях, виготовлених з феромагнітних матеріалів, найбільш ефективний магнітний метод, а з немагнітних матеріалів - вихрострумний або капілярний метод. Для виявлення внутрішніх прихованих дефектів доцільно застосовувати радіаційні або ультразвукові методи НК.

Чутливість методів НК визначається найменшими розмірами виявлених несучільностей:

- у поверхневих - шириною розкриття біля виходу на поверхню, протяжністю в глиб металу і по поверхні виробу;
- у внутрішніх - розмірами несучільності із зазначенням глибини залягання.

Чутливість залежить від фізичних особливостей методу НК, технічних параметрів застосовуваних засобів контролю, чистоти обробки поверхні контрольованої деталі, товщини деталі, фізико-хімічних властивостей її матеріалу, умов контролю та інших чинників. Оціночні дані про чутливість деяких методів НК наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Чутливість методів неруйнівного контролю

Метод НК	Мінімальний розмір виявлення нусучільності, мм		
	Ширини розкриття	Глибина	Протяжність
Візуально-оптичний	0,05-0,01	0,05	0,1
Капілярний (люмінесцентний)	0,001	0,01-0,03	0,1-0,3
Магнітопорошковий (люмінесцентний)	0,001-0,002	0,1-0,3	2-3
Вихрострумний	0,0005-0,001	0,15-0,2	0,6-2
Ультразвуковий	0,001-0,03	0,1-0,3	1,5-2
Рентгенографічний	0,1	1-1,5 (від товщини)	0,5-1

Фізичні властивості матеріалів мають найважливіше значення при виборі методів НК. Наведено короткий опис методів неруйнівних випробувань

для волоконних композитів і композитів з полімерною матрицею, армованих волокном. Розглянуті композитні матеріали в основному є композитними матеріалами з вмістом високомодульних (понад 20 ГПа) волокон. Особливу увагу приділяють композитним матеріалам, армованим безперервним (на противагу перервному) волокном.

Для застосування магнітного методу матеріал повинен бути феромагнітним і однорідним за магнітними властивостями структури. Вихрострумний метод контролю використовується переважно якщо матеріал електропровідний, однорідний за структурою і ізотропний за магнітними властивостями.

Для ультразвукового контролю матеріал повинен володіти хорошими характеристиками пружності.

Капілярний метод виправданий при непористому і стійкому до впливу органічних розчинників матеріалі. Він не може бути виконаний по лакофарбовому покритті.

Застосування радіографічного методу обмежується лише здатністю матеріалу поглинати дані випромінювання і товщиною матеріалу.

Застосування деяких методів для контролю виробів складної форми обмежена, наприклад, для ультразвукового методу - через труднощі розшифровки результатів контролю і наявності мертвих зон, а капілярного - через труднощі виконання окремих операцій, особливо підготовки деталей до контролю і видалення з поверхні проникаючої рідини. Також чутливість методів НК, особливо магнітопорошкового, капілярних, ультразвукових залежить від ступеня шорсткості поверхні, наявності на ній різних захисних покриттів. Вихрострумний контроль можливий при наявності покриттів товщиною 0,2 ... 0,5 мм.

#### **2.4. Види дефектів в композитних матеріалах**

Умови експлуатації деталі визначають найбільш ймовірні місця виникнення дефектів (табл. 2.4), пов'язаних з підвищеною концентрацією

напружень, впливом знакозмінних навантажень, агресивних середовищ, температурних впливів. Також будь-які конструктивні або технологічні дефекти можуть стати вогнищами втомного руйнування. Критичні місця конструкції виробу дозволяють виявити контроль неруйнівними методами. Технічні умови (ТУ) виробу включають в себе технічні вимоги до основних параметрів і характеристик, тим самим визначають кількісні критерії неприпустимості в ньому різного роду дефектів. При цьому в різних частинах конструкції виробу можуть бути різні вимоги до якості тих чи інших деталей. До того ж в ТУ вказують і методи контролю, які необхідно застосовувати на даному виробі. Вимоги про застосування різних методів НК можуть бути викладені і в інших документах: технологічних і конструкторських.

Таблиця 2.4

Дефекти ПКМ, які виявляються методами НК

Дефект	Акустична емісія	Течування	Радіографія, радіоскопія	Шерографія	Вимірювання деформації	Термографія	Ультразвуковий контроль	Візуальний контроль
Забруднення			X				X	X
Пошкодження волокон (ниток)	X		X					
Розшарування	X			X		X	X	X
Зміна щільності			X			X	X	
Деформація під навантаженням				X	X			
Порушення зв'язків				X		X	X	X
Порушення зв'язків між волокнами	X					X	X	
Порушення співвідношення волокон			X			X		
Розриви	X		X			X	X	X
Включення			X			X	X	X
Витоки	X	X					X	
Незакріплені або рухомі частини	X							
Мікротріщини	X		X	X			X	
Волога			X			X		
Пористість	X		X			X	X	
Вимірювання товщини			X	X		X	X	
Об'ємні включення								
Пустоти	X	X	X			X	X	

Для проведення аналізу дефектів, що зустрічаються в конструкціях з



полімерних композитів, зручно представити їх у вигляді блок-схеми, поділивши на різні групи за відносними розмірами і іншими параметрами (рис. 2.7). При цьому підході дефекти розділені на два великі класи:

- виробничі дефекти, які з'являються в конструкціях або в процесі їх виготовлення, або в процесі виготовлення складових матеріалів компонентів КМ,
- експлуатаційні ушкодження, що виникають в конструкції в процесі її експлуатації.



Рис. 2.7. Класифікація видів дефектів в композитних матеріалів

Мікроефекти - це дефекти армуючих волокон (мікротріщини, мікрровключення, мікропорожнечі, відхилення від форми, злами і ін.), дефекти матриці в проміжках між елементарними волокнами (мікропори, мікротріщини, мікрровключення і ін.), дефекти на поверхні розділу волокну-матриця та ін .

Мінідефекти - це закручування, викривлення, розорієнтація волокон, дрібні риски, подряпини, вм'ятини, обрив окремих ниток, джгутів або груп

елементарних волокон.

Макродефекти - це тріщини, які перетинають шари вглиб (надрізи), раковини, вм'ятини на поверхні КМ, дефекти ударного характеру, розтріскування, розшарування, випинання, непрочлеї, повітряні макровключення і ін.

Мікродефекти вуглецевих волокон. Основні типи дефектів є поверхневі та об'ємні мікропори, які утворюються в результаті виділення летючих компонентів. Далі, в процесі термообробки, ці пори трансформуються в мікротріщини, роблячи недосконалою структуру вуглецевого волокна. Вуглецеві волокна отримують при нагріванні целюлозних (поліакрилонітрильних і інших типів) волокон. Це складний процес, що виконується в кілька етапів. На першому етапі відбувається окислення при температурах 200 – 325 °С, при якому відбувається основна втрата маси і усадка волокна. На другому етапі проводять карбонізацію при температурах 1000 – 1500 °С. Потім при температурах 2500 - 2800 °С проводять графітизацію. Залежно від того, на якій стадії був перерваний процес виробництва, отримують або карбонізовані волокна, які відрізняються високою міцністю, або графітизовані волокна з високим модулем пружності (табл. 2.5).

Таблиця 2.5

Порівняльна характеристика карбонізованих та графітизованих волокон

Властивості	Карбонізовані волокна	Графітизовані волокна
Густина, кг/м <sup>3</sup>	1760	1940
Руйнівна напруга при розтягуванні	2,45-3,16	350-420
Модуль пружності під час розтягування	250-295	350-420
Відносне подовження при розриві, %	0,8-1,3	0,15-0,4

Спрощено модель структури вуглецевого волокна може бути представлена у вигляді послідовно чергових блоків-кристалітів, які з'єднані

між собою аморфними ділянками.

### Структура вуглецевого волокна

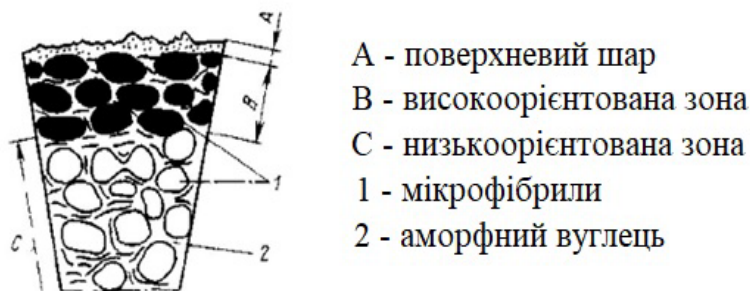


Рис. 2.8. Структура волокна

Властивості вуглецевих волокон (ВВ) дуже сильно залежать від умов карбонізації та графітизації (рис.2.10), оскільки саме вони визначають ступінь дефектності кристалів.

В результаті проведених досліджень встановлено, що карбонізовані ВВ містять велику кількість домішок, які являють собою не повністю вилучені коксові частки органічного полімеру (рис. 2.9, а).

Графітизовані ВВ містять істотно меншу кількість домішок (рис. 2.9, б) і саме з цієї причини мають більш стабільні електрофізичні властивості.

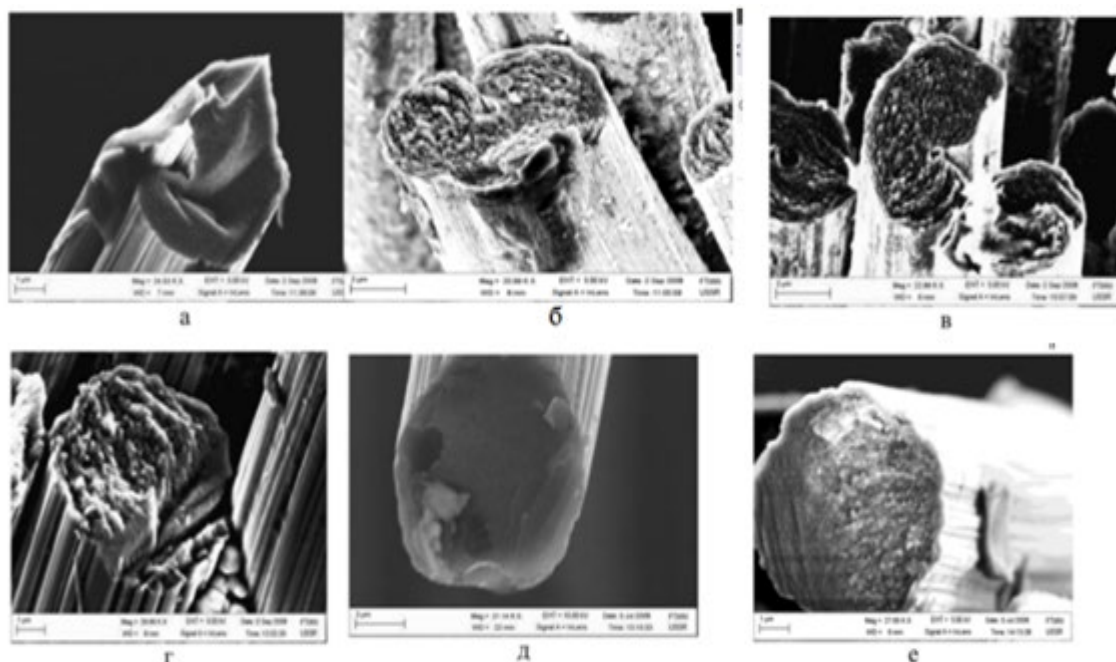


Рис. 2.9. Зовнішній вигляд елементарних ВВ марок: а - Елур; б, в - Кулон (різні партії); г - ЛУ; д - УКН-П; е - УКН-2-500

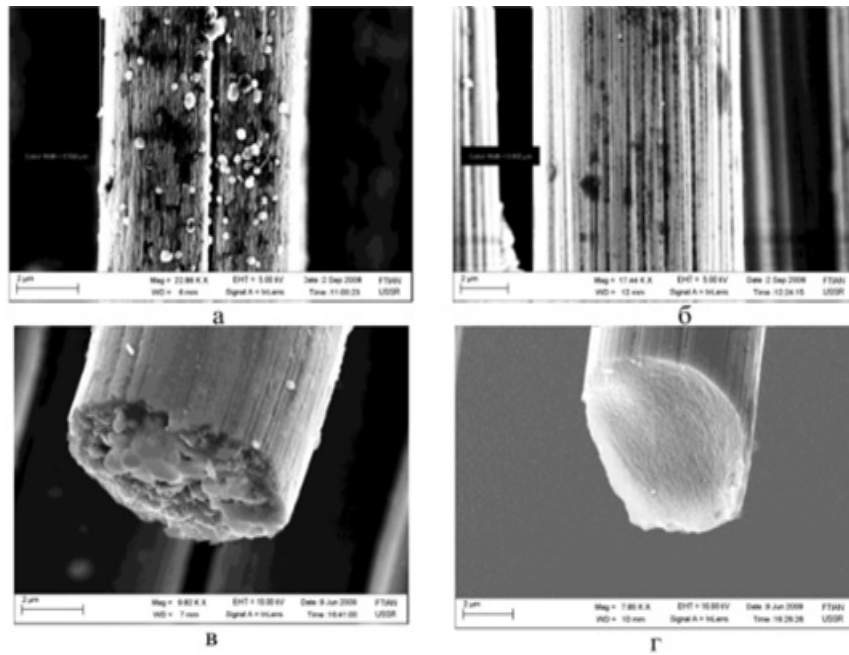


Рис. 2.10. Зовнішній вигляд карбонізованого (а,в) та графітізованого (б,г) вуглецевого волокна

Високоякісні ВВ виготовляються у вигляді джгутів, що складаються з 1000 і більше безперервних елементарних ниток. Максимальна кількість ниток в одному ВВ може досягати 10 000 штук. Діаметри елементарних ниток ВВ в одній партії завжди близькі один до одного і складають 5 ... 10 мкм (рис. 2.11).

У вуглецевих волокнах присутні частинки органічного полімеру, які утворюють «напливи». Дані напливи фактично є «непотрібним» сполучником і призводять до склеювання моноволокон (рис. 2.12).

Результати статті «Виключення поверхневих дефектів склотканини при обробці ВЧ-індукційною плазмою зниженого тиску». У представленій роботі розглянута можливість згладжування дефектів поверхні скловолокна в газовому високочастотному індукційному (ВЧІ) розряді. В якості об'єкту дослідження було обрано склотканина марки ЕЗ-200ПТ.

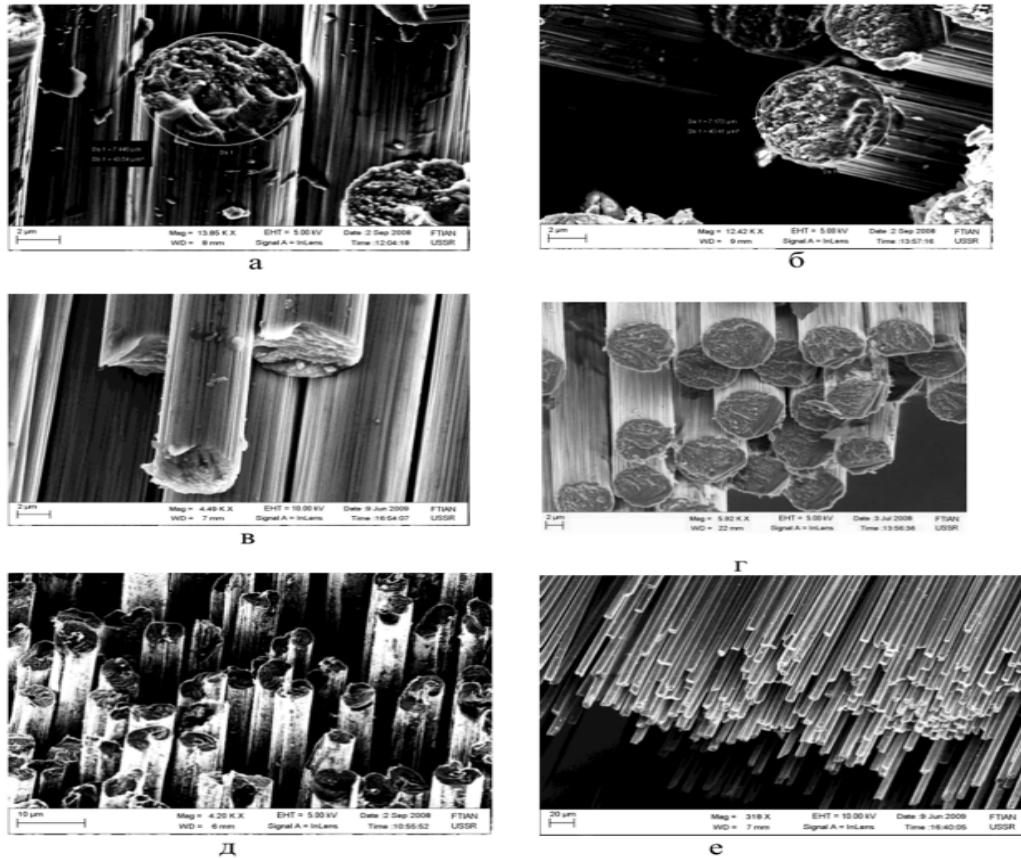


Рис. 2.11. Вуглецеве волокно марок УТ-900 (а, в, д), ПКН-2-500 (б, г, е) на зріз (фото з растрового мікроскопа)

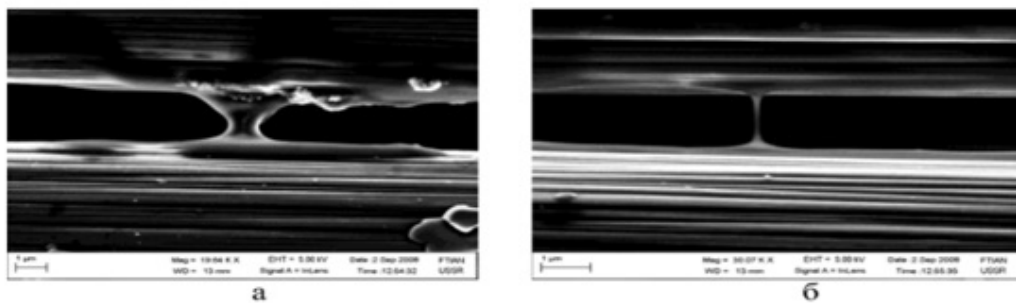


Рис. 2.12. Напливи в карбонізованих та гафтізованих вуглецевих волокон

Зразки склотканини закріплювалися за допомогою штатива-утримувача безпосередньо над зрізом плазматрона на висоті  $h = 50 \text{ мм}$ , час обробки  $T = 10 \text{ хв}$ . В ході обробки використовувався плазмоутворюючий газ  $\text{Ar}$ , витрата газу складала  $G = 0,06 \text{ г/сек}$ , тиск в робочій камері знаходився в діапазоні  $P = 60\text{--}90 \text{ Па}$ . При модифікації матеріалу напруга на аноді генераторної лампи ( $I_A$ ) варіювалося від  $1,0$  до  $2,5 \text{ А}$  з кроком  $0,5 \text{ А}$ .

Застосування ВЧІ плазмового полірування позитивно впливає на

зменшення шорсткості, так в найбільш ефективному режимі ( $t = 5 \text{ хв}$ ;  $G = 0,06 \text{ г/с}$ ;  $p = 60-90 \text{ Па}$ ;  $I_A = 2,5 \text{ А}$ ;  $h = 30 \text{ мм}$ ) (Зразок №4 в табл. 2.6) спостерігається зниження значення шорсткості  $R_a$  на 35,36 %,  $R_z$  на 39,6 %, а середній крок нерівностей збільшився на 32,8 %, що також говорить про згладжування поверхні. Отримані дані дозволяють припустити, що лугостійкість і міцності досліджуваного волокна підвищуються внаслідок усунення потенційних вогнищ корозії.

Таблиця 2.6

Середнє значення параметрів шорсткості склотканини ( $R_a$  -середнє арифметичне з абсолютних значень відхилень профілю в межах базової лінії;  $R_z$  - сума середніх абсолютних значень висот п'яти найбільших виступів і найбільших западин профілю в межах базової лінії;  $R_{sm}$  - середній крок нерівності)

№ Зразка /Умовне позначення	Контрольний	№1 (1,00 А)	№2 (1,50 А)	№3 (2,00 А)	№4 (2,50А)
$R_a$	0,0263	0,0327	0,0280	0,0410	0,0170
$R_z$	0,1480	0,1860	0,1583	0,2090	0,0893
$R_{sm}$	1,3713	1,3180	1,1017	1,3157	1,8277

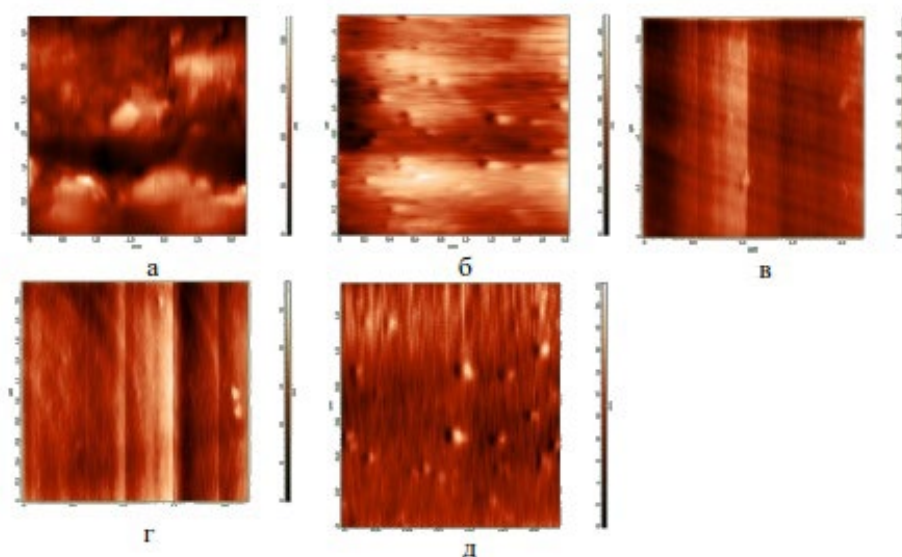


Рис. 2.13. АСМ – зображення волокон склотканини ЕЗ-200 ПТ, а - вихідне волокно; б -№1; в – №2; г - №3; д - №4

Автоматизація в обладнанні відбувається з використанням автоматизованої викладки волокон (AFP) і автоматизованої викладки стрічок

(ATL). Однак при відпрацюванні режимів викладки можуть з'являтися дефекти у вигляді нахлестів або зазорів (рис. 2,14) між сусідніми стрічками, паралельні напрямку викладки волокна. Ці зазори і перекриття можуть привести до зниження міцності, змінити локальну геометричну форму і мікроструктуру матеріалу, в порівнянні з умовами, коли викладання стрічки кладеться в стик. Для складних виробів допускається наявність даних дефектів розміром 1,5-2,0 мм.

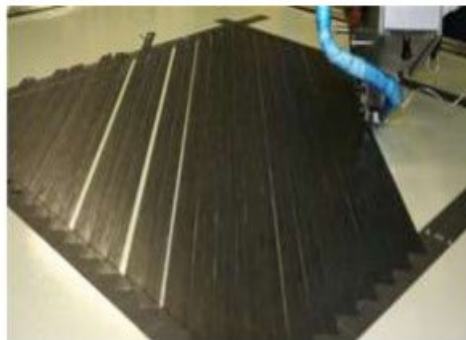


Рис. 2.14. зазори при укладанні препрега методом АФР

В процесі полімеризації композитів при їх виготовленні через внутрішні напруги, нерівномірного розподілу зв'язую чога та інших технологічних факторів можуть виникати розшарування, відшарування окремих шарів, рихлість, тріщини та ін. Також можливі обриви ниток, джгутів арматури і т. п. (рис. 2.15).

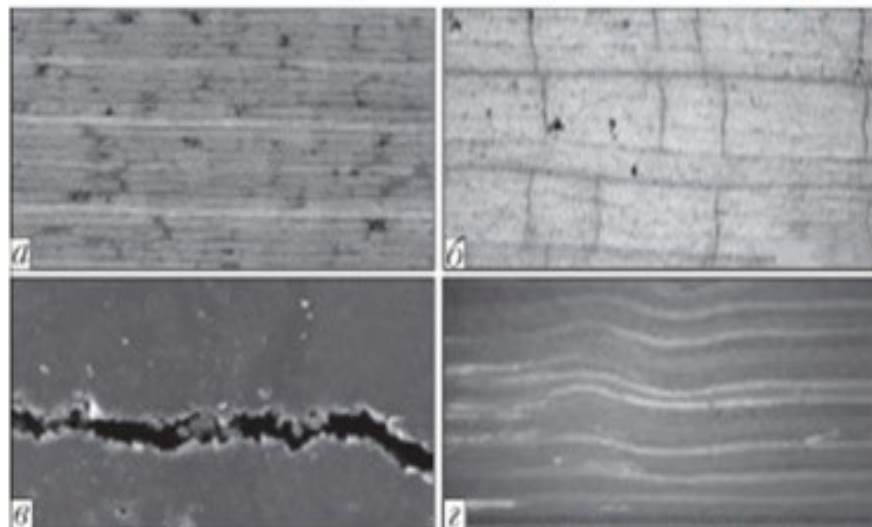


Рис.2.15. Дефекти КМ: а – пори(темні); б – тріщини; в – розшарування; г – хвилястість.

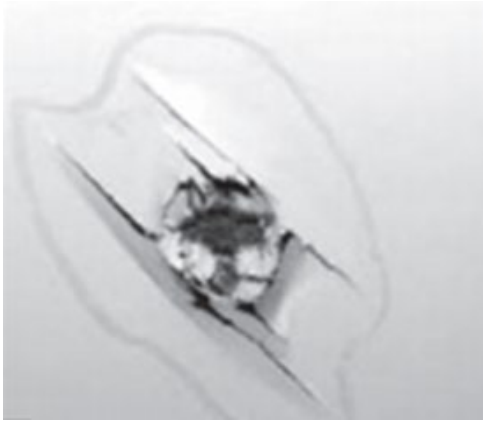
Характерні дефекти типових методів формувань виробів з композитних матеріалів

№ п/п	Метод формування	Характеристика виробів	Дефекти формування
1	Контактне формування (без накочення, з прикочуванням, з ущільненням)	Великогабаритні вироби складною формою, оболонки, листи великих розмірів	Пористість, розшарування, різнотовщинність, нерівномірний розподіл сполучника, ділянки неповного затвердіння, збільшення розкиду ФМХ, складки, різна орієнтація волокон, ділянки з низьким вмістом сполучника, волосовини на поверхні.
2	Формування еластичної діафрагми	Велико - та середньогабаритні листи складної форми	Нерівномірний розподіл сполучника, різна орієнтація волокон, розшарування, локальна пористість, ділянки неповного затвердіння, затвердіння сполучника
3	Авто та гідроклавне формування	Велико - та середньогабаритні листи простої та складної форми	Розшарування, пористість, складки, різна орієнтація волокон.
4	Вакуумне формування	Середньогабаритні листи простої та складної форми	Пористість, складки армуючих слоїв, нерівномірний розподіл сполучника
5	Метод сухого та мокрого намотування (односпрямована)	Велико та середньогабаритні вироби типу обертання тіл (циліндричний, сферичний, конічні та інше)	Розшарування, пористість, складки, різна орієнтація волокон, потовщення в зонах нахлестів витків, іногородні включення, обриви та викривлення волокон

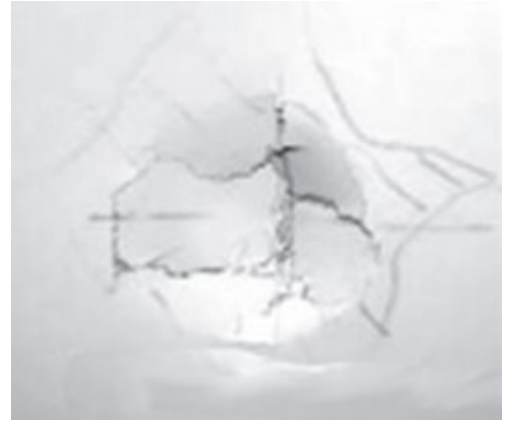
Характерні види експлуатаційних дефектів, які виявляються при візуальному контролі, показані на (рис. 2.16.) На відміну від металевих, дефекти КМ в процесі експлуатації можуть швидко збільшуватися, що призводить до зниження надійності конструкції. Через поверхневу тріщину матриці волога проникає всередину композиту і розриває його, знижує його модуль пружності. Частий дефект у вигляді розшарування призводить до зниження міцності на стиск, обриву волокон, зменшує зусилля на розрив.

Серйозним дефектом сотових панелей є відшарування та обрив обшивки від сотового заповнювача (рис. 2.17) та (рис 2.18).





а)



б)

Рис. 2.16. Приклади зовнішніх пошкоджень КМ: пошкодження поверхні крила (а) та фюзеляжу (б)



Рис. 2.17. Відшарування обшивки сотової панелі.

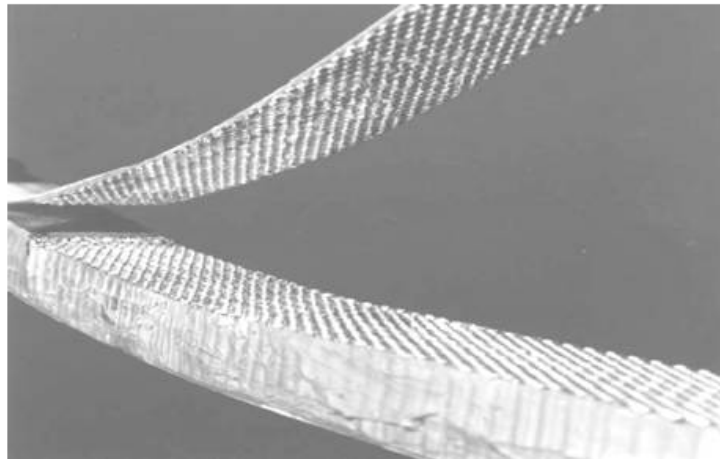


Рис. 2.18. Відрив обшивки сотової панелі через погані адгезійні властивості клею.

Причинами появи цього виду дефекту є наступні:

- брак, допущений при виготовленні, тобто погані адгезійні властивості клею або непоклей поверхонь;

- наявність води в сотовій конструкції;
- відшарування, викликані механічними впливами (ударами) на панель, даний тип дефекту може виникати, наприклад, при ходінні обслуговуючого персоналу по поверхні панелей.

Однією з основних причин появи відшарувань в сотових панелях є потрапляння води в осередки сотового заповнювача. Як показали дослідження, проведені в лабораторії ARML, Австралія, волога в сотах, при досить великій вологості повітря (близько 85%) і температурі навколишнього середовища близько 80 °C, істотно впливає на зчіпні властивості клею, що може привести до відриву обшивки від пористої структури і руйнування осередків сотового заповнювача. Особливо підкреслюється той факт, що області клею, безпосередньо контактуючі з водою, змінюють свої властивості і колір. Зокрема, зміна кольору клею може бути використано при розслідуванні причин аварій літаків.

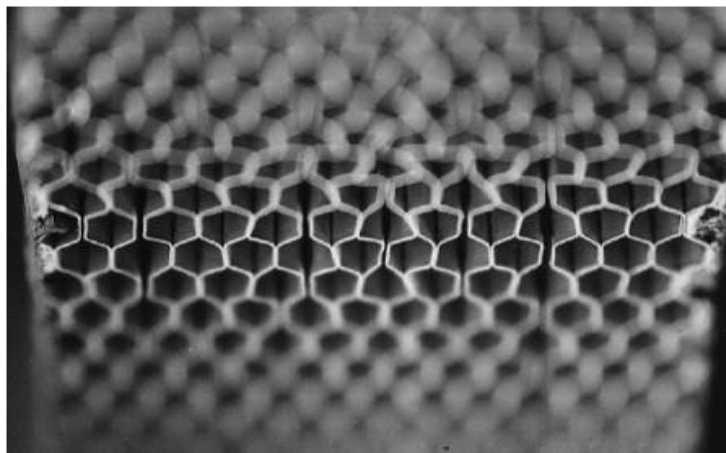


Рис. 2.19. Руйнування осередків сотового заповнювача.

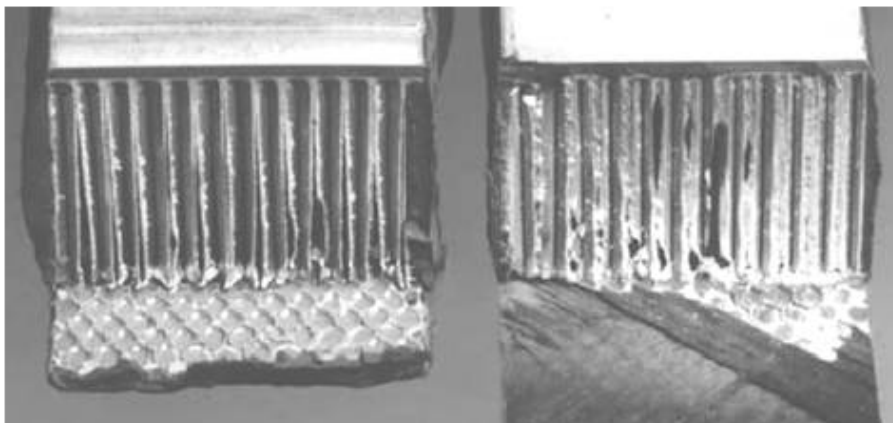


Рис. 2.20. Зміна властивостей (кольору) клею в результаті тривалого контакту панелі з водою.

У процесі польоту вода зазнає фазові перетворення, так як температура за бортом літака може змінюватися від  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Збільшення обсягу води при замерзанні може викликати руйнування осередків сотових конструкцій і відрив обшивки. Наявність води призводить також до обваження сотової конструкції, що збільшує злітну вагу і знижує міцність панелей.

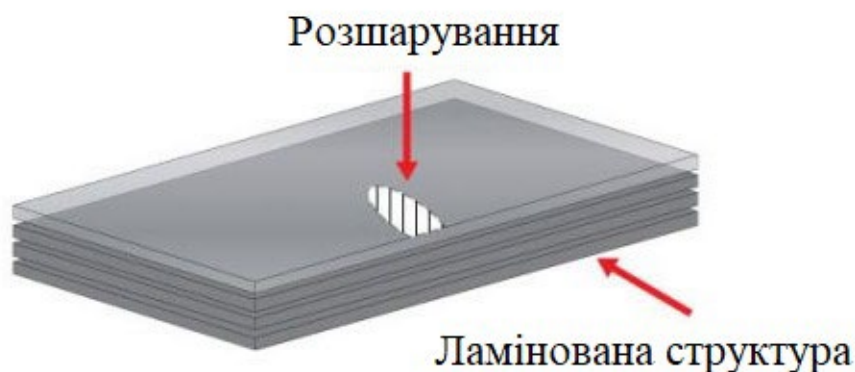


Рис. 2.21. Розшарування багатошарової структури

Ударні впливи на елементи конструкції призводять до пошкодження компонентів, виконаних з композиційних матеріалів. Тип пошкодження буде залежати від особливостей, складу і щільності структури з КМ. В композитних багатошарових структурах, дефекти, що виникають внаслідок ударної дії - це, частіше за все, розшарування між різними шарами фюзеляжу і обшивкою крила. Ударні навантаження можуть також викликати відшарування між обшивкою і елементом жорсткості. Дефекти клейових з'єднань істотно

впливають на цілісність конструкції. Фюзеляжі літаків B787 і A350 майже повністю виконані з багатошарових композитів.

Композитні сендвіч-структури, що представляють собою тришарові конструкції з двох шарів композиційного матеріалу і заповнювача (NOMEX і т.п.) між ними, можуть мати різні типи пошкоджень. Можна виявити такі дефекти, викликані ударним впливом (рис. 2.22):

Тип А - розшарування між шарами зовнішньої обшивки із пластику, армованого вуглецевим волокном, паралельно поверхні

Тип В - відшарування зовнішньої обшивки від сотового заповнювача

Тип С - тріщина в сотовому заповнювачі, паралельно контрольованій поверхні

Тип D - деформація заповнювача (змінання) в паралельних зонах

Тип Е - відшарування внутрішньої обшивки від сотового заповнювача

Тип F - проникнення рідини в сотвий заповнювач

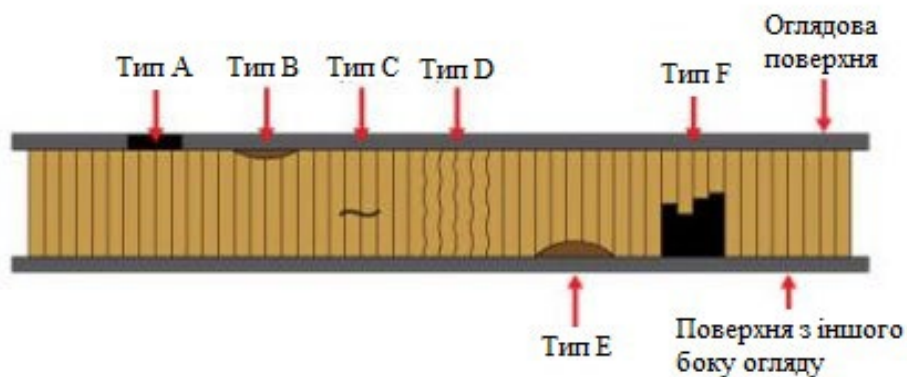


Рис. 2.22. Можливі пошкодження в композитні сендвіч структурі

Типові дефекти елементів корпусних конструкцій на основі шаруватих панелей з композиційних матеріалів, що з'являються в процесі навантаження, представлені на рис. 2.23.

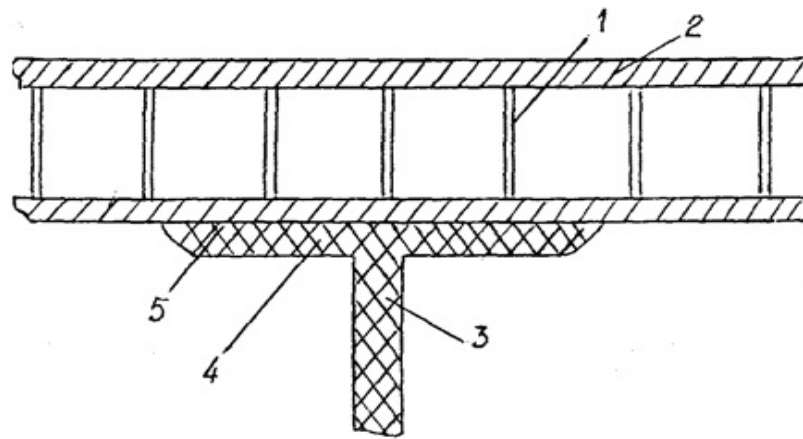


Рис. 2.23. Типові дефекти конструкції з КМ: 1- розшарування трубчатого заповнювача обшивки; 2 – розшарування зовнішньої та внутрішньої обшивки; 3 – розшарування стінки лонжерона; 5 – розшарування поясу лонжерона від внутрішньої обшивки

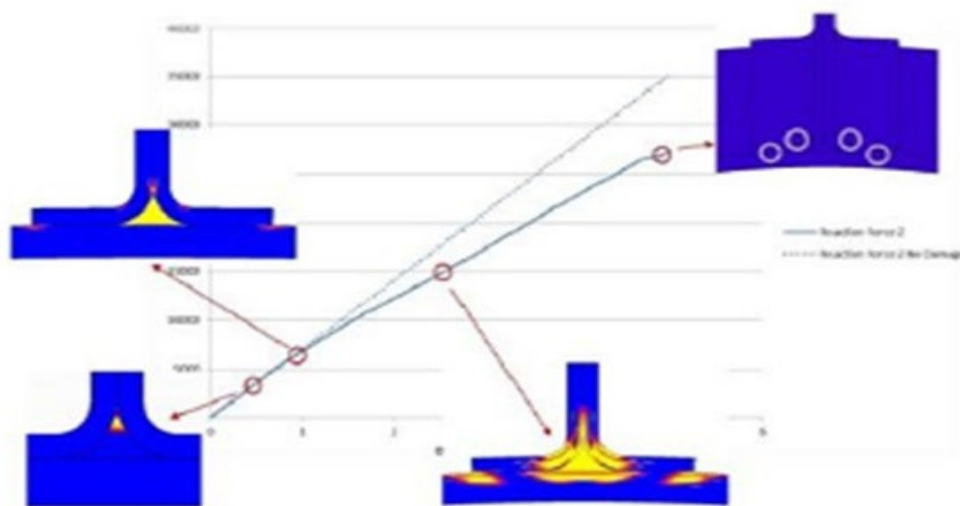


Рис.2.24. Крива сила переміщення з урахуванням прогресуючої руйнації

В авіабудуванні широко застосовують склопластики, які при порівняно простій технології дозволяють виготовляти великогабаритні і складної конструкції деталі (обтічники радіолокаційних антен, ступки ніш шасі і ін.). Великого поширення в авіабудуванні отримують вугле- і органічні пластики, з яких виготовляють відповідальні конструктивні елементи планера повітряного судна. Поряд з високою втомною міцністю, жорсткістю і стійкістю до корозійних впливів ці матеріали мають малу питому масу в порівнянні з металами, що дозволяє значно знизити вагу.



Рис. 2.25. Застосування ПКМ на літаку Ан -178, жовтий колір – зі склопластику, червоний – із вуглепластику

В конструкції літака Ан-124 "Руслан" використано близько 5,5 т вугле- і склопластиків загальною площею 1500 м<sup>2</sup> що дозволило на 2 т знизити вагу машини і зберегти 5 т металу при економії 18 тис. т (палива за період експлуатації). При цьому трудомісткість виготовлення трьох тисяч деталей з композиційного матеріалу була знижена вдвічі при скороченні числа комплектуючих в 12 разів. Аналогічні технології використовуються в літаках третього покоління Ту-204, Іл-96, Ан-74, Ан-70, Ан-140, а також в літаках зарубіжних фірм.

В останні роки ведуться дослідження зі створення композиційних матеріалів, що складаються з чергуючих шарів алюмінієвого сплаву і органоластика. Представником цієї групи матеріалів є алор. Алор успішно замінює алюмінієві сплави, збільшуючи при цьому ресурс і надійність експлуатації транспортних засобів з одночасним зниженням ваги від 10 до 60%. При цьому зменшується швидкість росту втомної тріщини в 10 - 50 разів. Алор рекомендується для обшивки фюзеляжу і крил літальних апаратів, вібронавантажених вузлів літаків, автомобілів, автобусів. Алор піддається всім видам механічної обробки як і алюмінієві сплави.

З метою визначення напружено-деформованого стану матеріалу в процесі експлуатації в шар органоластика алора вбудовані активні структурні

елементи, що несуть силове навантаження і реагують на перевищення розрахункового польотного навантаження і досягнення передруйнівного стану.

Принципова відмінність цих структурних елементів від звичайних датчиків контролю деформації полягає в тому, що крім інформаційної функції, вони несуть і силову, сприймаючи несуче навантаження.

Структура такого типу матеріалу представлена на рис. 2.26, а схема його роботи на рис. 2.27.

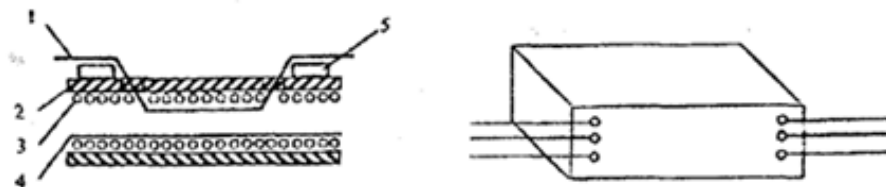


Рис. 2.26. Структура матеріалу алор з елементами активного контролю: 1 – пороговий датчик; 2 – алюмінієвий сплав; 3 – армуюча тканина; 4 – плівковий клей; 5 – ізоляційний папір

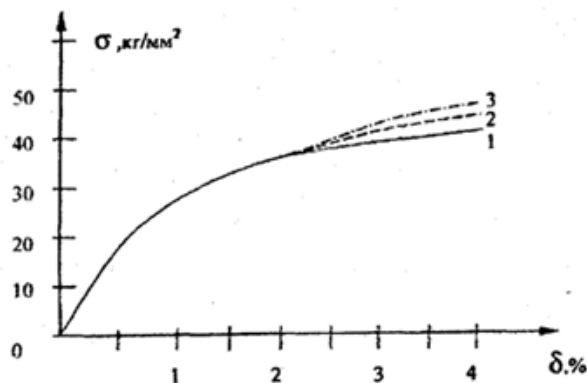


Рис. 2.27. Схема роботи порогових давачів в складі алор: 1 – алор з давачем 1 – рівня, 2 – алор з давачем 2- рівня; 3 – алор з двома давачами

При розтягуванні до деформації 0,5% спрацьовує перший датчик, при подальшому збільшенні навантаження - другий.

У перспективі передбачається створити матеріал зі зворотним зв'язком,

який міг би активно реагувати на зовнішні впливи, наприклад, на виникнення небезпечного резонансу конструкції і змінювати свої властивості з метою відходу від резонансу, наприклад, збільшувати жорсткість або загасання. Такі матеріали можуть бути створені на основі композиційних матеріалів, що мають в своєму складі елементи з пам'яттю форми з сполук титану, які будучи розташовані певним чином в структурі композиційного матеріалу, при проходженні сигналу від керуючої системи змінюють або жорсткість цього матеріалу або форму конструкції.

Виникнення дефектів в деталях з композиційних матеріалів в більшій мірі пов'язане з технологічними причинами в процесі виробництва. Так, навіть мала частка порожнин в об'ємі матриці впливає на властивості міцності (рис. 2.28). На практиці обмежуються пористістю до 5 %, а за допомогою спеціальних методів до 0,5 - 1,0 %.

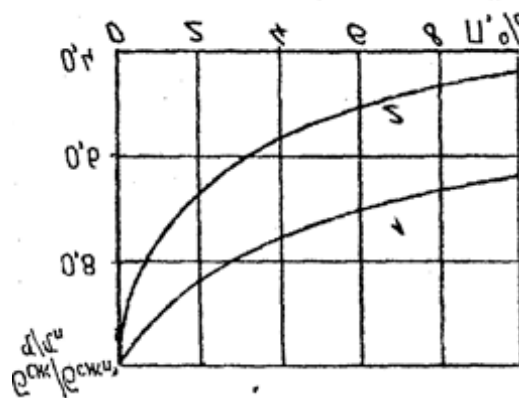


Рис. 2.28. Вплив пористої матриці на міцність склопластика: 1 – при стиску; 2 - при тепловому зрушенні

В процесі виготовлення елементів з композиційного матеріалу необхідно враховувати високу чутливість полікристалічних неорганічних волокон до механічних пошкоджень. Якщо при виготовленні потрібно вигин волокон з радіусом  $R$ , то максимально допустимий діаметр волокна  $d_{max}$  розраховують за формулою, яка враховує міцність волокна  $\sigma_B$  і модуль пружності волокон  $E_B$ :

$$d_{max} = 2\sigma_B R / E_B$$

Якщо діаметр волокон буде більше максимально допустимого, вони при



вигині руйнуються.

Міцність композиційного матеріалу залежить від об'ємної частки волокон (рис. 2.29).

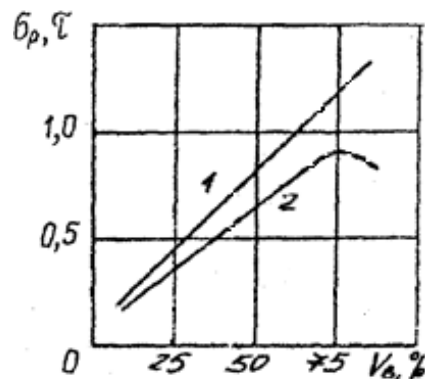


Рис. 2.29. Залежність міцності від об'єму частки волокон: 1,2 – при розтязі та стисканню вздовж волокон

При навантаженні композиційного матеріалу волокна і матриця деформуються спільно. При певних значеннях модуля пружності  $E_x$  (у напрямку осей волокон) матриці, волокон і композиції закон Гука може бути записаний у вигляді:

- для матриці  $\sigma_{XM} = \varepsilon_{XM} E_{XM}$
- для волокон  $\sigma_{XB} = \varepsilon_{XB} E_{XB}$
- для композиції  $\sigma_{XK} = \varepsilon_{XK} E_{XK}$

- де  $\sigma_x$  та  $\varepsilon_x$  - відповідно напруга і деформація при навантаженні.

Відношення значень деформації композиційного матеріалу в напрямках перпендикулярно осі волокон  $Y$  і паралельно осі волокон  $X$  характеризується коефіцієнтом Пуассона для композиції:

$$V_{XYK} = \varepsilon_{YK} / \varepsilon_{XK}$$

Такі технологічні дефекти, як неоднорідність розподілу волокон за об'ємом, розорієнтація і розкид властивостей компонентів призводять до того, що реальні характеристики армованих композицій відрізняються від розрахункових, тому для паспортизації композиційних матеріалів зазвичай використовують експериментально визначені константи. Такі константи можуть бути визначені, наприклад, з правила сумішей. У спрощеному вигляді

правило сумішей, представляють, розглядаючи характер деформації композиційного матеріалу під дією навантаження розтягу яке прикладено паралельно осі волокон. Припускаємо, що матриця більш пластична ( $\epsilon_M > \epsilon_B$ ) і має менший модуль пружності, ніж волокна (рис. 2.30).

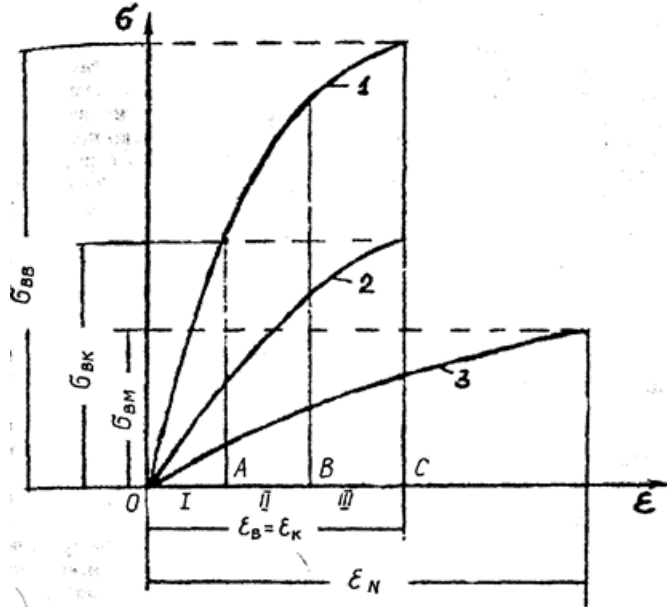


Рис. 2.30. Залежність розтягу КМ: 1 – для волокна; 2 – для композиції; 3 – для матриці

У цьому випадку крива 2 розтягу композиційного матеріалу складається з трьох основних ділянок:

- I (OA) - матриця і волокна деформуються пружно;
- II (AB) - матриця переходить в пружно-пластичний стан волокна продовжують деформуватися пружно;
- III (BC) - обидва компонента системи знаходяться в стані пластичної деформації.

Прийнявши допущення, що деформація всіх елементів композиційного матеріалу однакова аж до руйнування, знайдемо межу міцності композиційного матеріалу ( $\sigma_{BK}$ ) у вигляді лінійної функції від об'ємної частки волокон ( $V_B$ ):

$$(\sigma_B)_k = (\sigma_B)_B \cdot V_B + \sigma'_M (1 - V_B) \quad (2.1)$$

- де: -  $(\sigma_B)$  - середнє значення межі міцності волокон при розтягуванні;
- $(\sigma'_M)$  напруга в матриці в момент руйнування волокон.

Зазвичай приймають  $\sigma'_M \cong \sigma_T$  матриці, а рівняння називають правилом сумішей ( $\sigma_T$  - межа текучості матриці).

На практиці в багатьох випадках допущення рівняння порушуються в результаті дефектності волокон і в цілому міцність композиції буде менше розрахованої за правилом сумішей.

Однак, можливі випадки, коли реальна міцність односпрямованого армованого матеріалу буде вищою, ніж це впливає з правила сумішей. Це відбувається за рахунок того, що при наявності пластичної матриці і волокон зв'язок між ними ускладнює утворення шийки на волокнах, і в кінцевому підсумку збільшує умовну межу міцності волокон. Кінетика руйнування композиційного матеріалу наступна: в момент розриву волокна напруга падає, але при подальшому навантаженні матриця деформаційно зміцнюється і навантажує зруйновані волокна. Вся композиція зруйнується тільки після того, як вичерпається запас пластичності матриці. Саме з розривами волокон пов'язаний характерний вид діаграми розтягування армованих систем, що представляє собою зубчасту форму, так як, коли волокно руйнується, навантаження, яке їм сприймалося, передається матриці. При подальшому збільшенні навантаження в матриці відбувається локальний наклеп і навантаження зростає настільки, що вона стає здатною навантажити нові відрізки волокон до їх руйнування в іншому перерізі.

Якщо ж композиція складається з крихких волокон з великим розкидом міцності і малопластичної матриці (наприклад, боропластики, вуглепластики, склопластики), то використання при оцінці міцності композиційного матеріалу середньої міцності волокон призводить до великих погрешностей. Розрив волокна, що з'явився в одному перерізі, не призводить до руйнування всіх волокон в цьому ж перерізі, оскільки внутрішні дефекти в волокнах розподілені статистично. За першим розривом в одному перерізі слідує розрив іншого волокна в іншому перерізі. Ці розриви накопичуються по довжині зразка і після досягнення деякого критичного стану призводять до руйнування композиційного матеріалу в цілому.

Одна з найбільш важливих характеристик композиційного матеріалу - його опір поширенню тріщин або в'язкість руйнування. У будь-якому матеріалі завжди є дефекти (пори, тріщини, раковини і т.д.), які під дією порівняно невеликих напруг можуть розростися і призвести до катастрофічного руйнування.

Не слід думати, що міцний матеріал обов'язково добре чинить опір поширенню тріщин. При великій статичній міцності у нього може бути низька в'язкість руйнування, яка лімітується процесами розвитку тріщин. Один і той же матеріал при випробуванні щодо тонких зразків може вести себе як пластичний і в'язкий, а при випробуваннях великих зразків і деталей стає крихким. Це пов'язано зі зміною напруженого стану біля вершини розповсюджуючої тріщини - переходом від плоского напруженого стану до плоского деформованому стану.

Щоб охарактеризувати в'язкість руйнування, потрібно ввести кількісний критерій, за допомогою якого можна було б порівнювати різні матеріали. Енергетичний підхід до аналізу руйнування матеріалів, що базується на теорії Гріффітса, дає можливість оцінювати опір просуванню тріщин за допомогою критерію  $G$ , що представляє собою швидкість звільнення пружної енергії при розкритті тріщин. Значення критерію  $G$ , необхідного для поширення тріщини, на одиницю довжини, визначається при плосконаправленому стані за допомогою співвідношення

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (2.2)$$

де  $\sigma$  - прикладена напруга;

$a$  - довжина тріщини;

$E$  - модуль пружності.

Параметр  $G$  називають також "ймовірністю руйнування". Величина  $G$  досягає критичного значення, коли добуток  $\sigma^2$  стає критичним і, починаючи з цього моменту, тріщина зростає мимовільно, витрати енергії на її просування не потрібні, а звільнена при розкритті тріщини пружна енергія перевищує

поверхневу, необхідну для утворення нової поверхні руйнування і, таким чином, тріщина стає нестійкою, поширюється по тілу матеріалу і призводить до його руйнування.

Однак, для армованих композиційних матеріалів характерні такі механізми руйнування, пов'язані з наявністю в композиційному матеріалі великої кількості поверхонь розділу, які можуть стати гальмом на шляху поширення тріщин (відшарування волокна від матриці, розрив і проковзування волокон, витягування волокон з матриці і пластична деформація матриці) зображено на рис. 2.31.

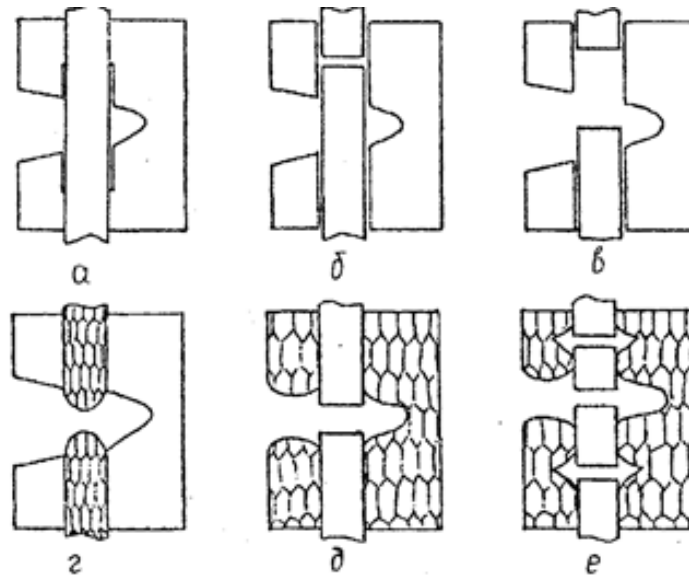


Рис. 2.31. Механізми руйнування КМ: а – розшарування волокна від матриці; б – розрив волокна і прослизання; в – витягування волокна; г – пластична деформація та розтяг волокна; д – тендітне руйнування волокна і пластичне течія матриці; е – масоване руйнування волокна і пластична деформація матриці поблизу кожного розриву волокна

В умовах циклічних навантажень композиційні матеріали мають високу стійкість, при цьому їх втома відмінна від втоми металів за множинністю типів руйнування, чутливості до надрізів і поведінки при стисненні. При рівній масі односпрямовані композиційні матеріали (скло і вуглепластики) мають міцність від втоми в 2-3 рази вище в порівнянні з конструкційними металами.

Найбільш поширені типи руйнування композиційних матеріалів (рис. 2.31) часто виникають на дуже ранній стадії циклічного навантаження і залежать як від числа циклів  $N$ , так і від амплітуди напружень (рис. 2.32). Такі типи руйнувань призводять до поступового зниження жорсткості в процесі втоми (рис. 2.33) внаслідок дисперсії пошкоджень в обсязі. Поступове зниження жорсткості забезпечує живучість конструкції і дозволяє легко виявляти пошкодження на безпечному етапі (до допустимої зміни жорсткості).

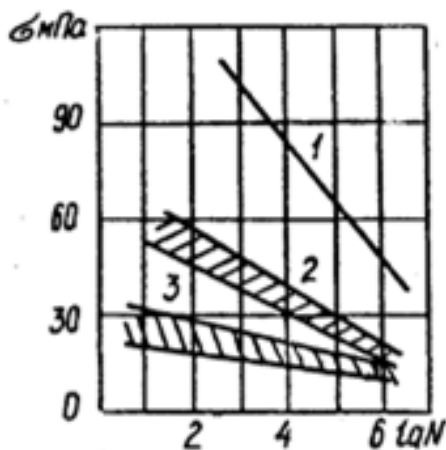


Рис. 2.32. Залежність міцності композита поліефірна смола скловолокна від числа циклів навантаження: 1 – розшарування; 2 – розтріскування; 3 – руйнування границі розподілу волокно-матриця

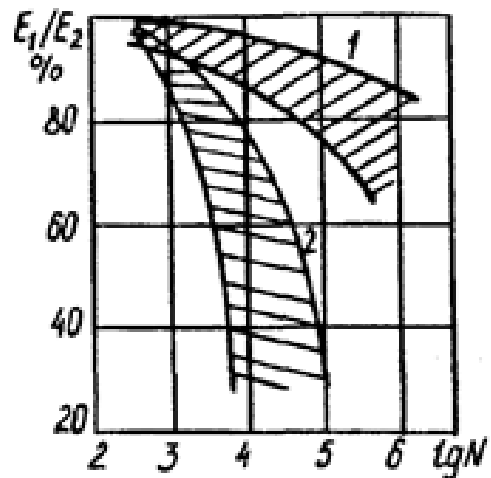


Рис. 2.33. Падіння жорсткості склопластику при втомі навантаження: 1 – ізотермічне; 2 – неізотермічне

Поведінка композиційних матеріалів з концентраторами напружень також має особливості в порівнянні з металами. Чутливість до концентраторів напружень (надрізи, отвори) у композиційних матеріалів значно *нижче* і зменшується з ускладненням схеми укладання волокон. При цьому зниження несучої здатності композиційного матеріалу від введення, наприклад, кругового отвору, не відповідає величині теоретичного коефіцієнта концентрації напружень (рис. 2.34).

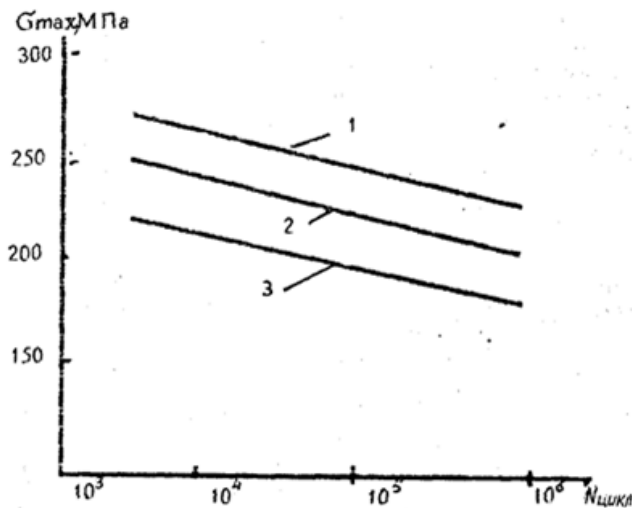


Рис. 2.34. Опір втоми вуглепластика в залежності від концентрації напруги: 1 – гладкі зразки; 2 – зразки с отвором діаметром 3 мм; 3 – зразки з отвором діаметром 6 мм

При використанні в конструкціях композиційних матеріалів слід враховувати їх більш низьку стійкість до втоми при стисненні, ніж при розтягуванні, що може пояснюватися спільним випинанням сусідніх волокон в поєднанні із зсувом матриці.

Важливою особливістю шаруватих композитів є крайовий ефект, що полягає у виникненні концентрації напружень в області вільних кромки, де починаються зазвичай все міжшарові руйнування при навантаженні. Такі руйнування поширюються всередині зразка і з'єднуються один з одним. Крайові ефекти можуть спостерігатися в області отворів і інших порушень суцільності.

Істотний вплив на характеристики міцності конструкцій з композиційних матеріалів в процесі експлуатації надає комплекс кліматичних факторів, основними складовими якого є температура і вологість. Процеси взаємодії полімерних композиційних матеріалів з атмосферною вологою істотно відрізняються від корозії металевих конструкцій у вологих середовищах. Для полімерних композиційних матеріалів на основі вологостійких вуглецевих і борних волокон вплив вологи пов'язують з процесами сорбції її сполучником і міжфазним кордоном, в результаті чого

спостерігається набухання матриці (викривлення, утворення тріщин), зміна її хімічних і фізичних властивостей і, як наслідок, механічних властивостей всього матеріалу. Коли опір розтягуванню вуглепластика уздовж волокон при вмісті води до 1,5 % практично залишається незмінним в широкому температурному інтервалі, при тих же умовах при розтягуванні в напрямку перпендикулярно волокнам міцність різко знижується при температурі вище 50 °С і досягає 10 % від початкової міцності.

Вологопоглинання композиційного матеріалу до насиченого стану оцінюється збільшенням ваги на 1,5 - 1,8 % від загальної ваги композиту і залежить від утримування в полімері, а також від об'ємного вмісту сполучника і температури (температура прискорює вологопоглинання).

Значний вплив на надійність КМ надають способи з'єднань:

- внаслідок виникнення крайових ефектів в зонах свердління і при застосуванні різних способів механічної обробки та традиційних типів механічних з'єднань виникають концентратори напружень;
- для композиційних матеріалів використовують в основному клейові з'єднання типу внахлест (рис. 2.35).

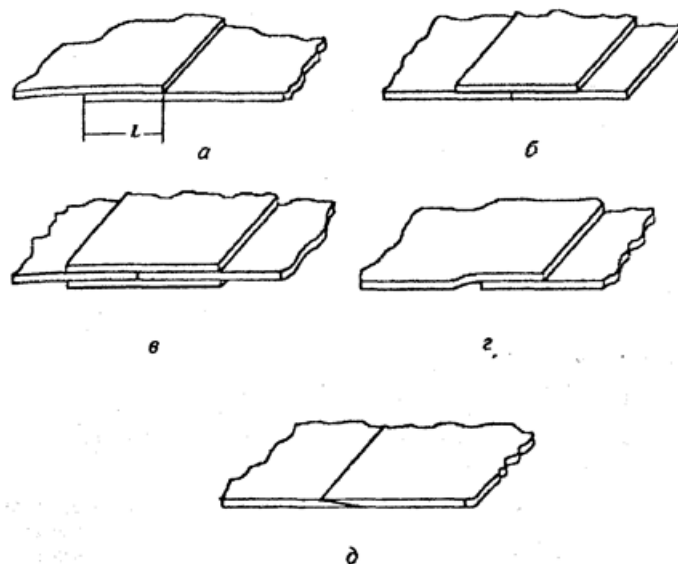


Рис. 2.35. Типові клеєві з'єднання листів із КМ: а – одинарні; б – встик з однією накладкою; в – стик з двосторонній накладкою; г – накладка с підсічкою; г – на «вус»



У таких з'єднаннях переважно виникають напруги зсуву, а на ділянках, близьких до периферії площі склеювання, можуть з'являтися і напруги розтягнення в напрямку перпендикулярно площині склеювання, що в кінцевому рахунку призводить до виникнення відривів.

Довжину нахлестки з'єднання (рис. 2.35, а) визначають за формулою

$$L = \frac{N}{\tau_B}, \quad (2.3)$$

де  $N$  - навантаження на одиницю довжини з'єднання, Н/м;

$\tau_B$  - міцність на зрушення клейового прошарку.

Вплив порядкового розташування моношарів на міцність проектного елемента конструкції: правила, рекомендації та особливості поведінки пакетів моношарів КМ (рис. 2.36):

1. Шари з однаковим кутом армування слід укладати симетрично щодо середнього шару в пакеті або, в разі парного числа шарів, щодо середньої поверхні.

2. Збалансоване укладання дозволяє уникнути виникнення згинальних, розтягуючих і обертаючих сил. Це означає, що на кожен шар  $-45^\circ$  має існувати рівна кількість шарів з орієнтацією волокон  $+45^\circ$ .

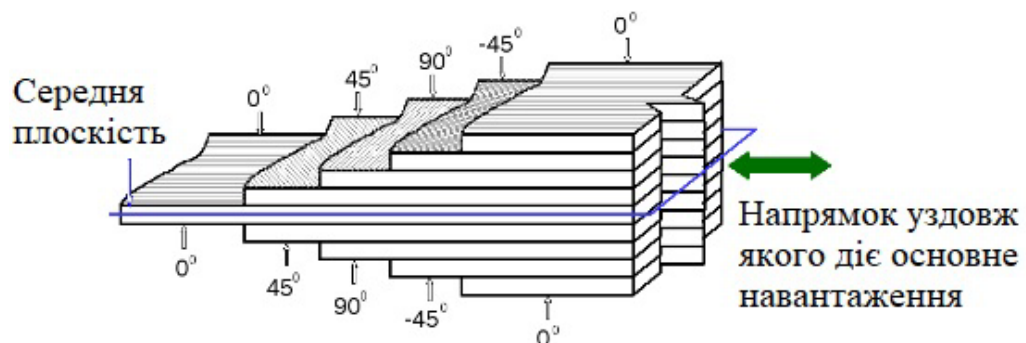


Рис. 2.36. Приклад симетричного розподілу шарів матеріалу.

Недотримання правил 1 та 2 може призвести до проблем, показаних на рис. 2.37:

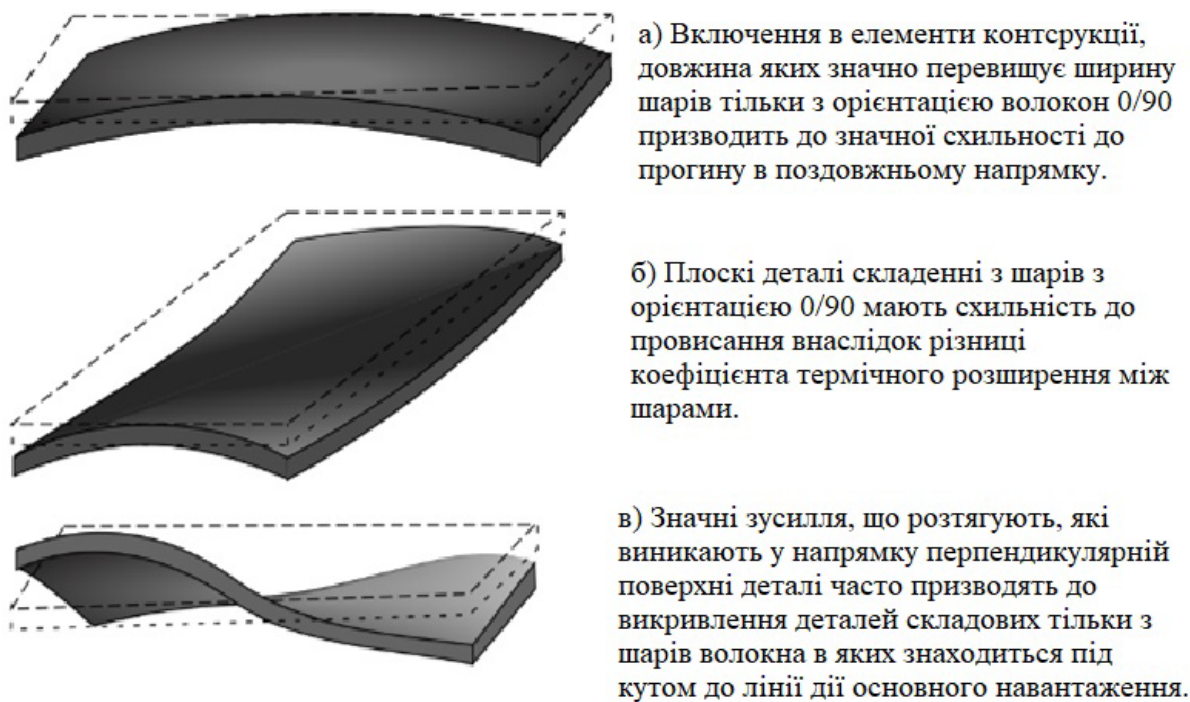


Рис. 2.37. Вплив поєднання моношарів різної орієнтації на стабільність елементів конструкції з КМ.

3. Порядок складання армуючих шарів безпосередньо впливає на згинальну жорсткість матеріалу і його реакцію на згинальні зусилля (рис. 2.37, в). Найбільшою твердістю на вигин серед елементів конструкцій, близьких до листових по геометричним параметрам мають ті, в яких близько до поверхні розташовані шари з орієнтацією армуючих волокон під кутами  $\pm 45^\circ$  та  $90^\circ$  відносно напрямку діючого навантаження. В елементах, які відповідно до їх типорозміру можна віднести до балок, найбільша жорсткість на вигин віддається шарам з орієнтацією армуючих волокон під кутом  $0^\circ$ .

4. Шари, що прилягають до місць з'єднань, оптимально розташовувати паралельно виникаючим в з'єднанні навантаженні. *Найменшою* ефективністю в таких випадках мають шари з розташуванням армуючих волокон під кутом  $90^\circ$  відносно діючого навантаження.

5. Слід уникати різниці кута орієнтації армуючих волокон понад  $60^\circ$ , тому що перевищення цього значення призводить до утворення мікротріщин і негативно позначається на характеристиках по міжшаровому зрушенню і

втомної міцності. Це правило не завжди працює для конструкцій з кількістю шарів менше 16.

6. По можливості слід уникати групування шарів з орієнтацією волокон  $90^\circ$  (або  $0^\circ$  - напрямом дії критичного навантаження), розділяючи їх шарами  $0^\circ$  (або  $90^\circ$  - напрямом дії критичного навантаження) та  $\pm 45^\circ$  для мінімізації міжшарового зсуву і нормальних напружень.

7. Не слід розташовувати більше 6-8 однотипних шарів поспіль що б уникнути розщеплення по краю.

8. Оптимальним варіантом для поверхневого шару є орієнтація армуючих волокон під кутом  $\pm 45^\circ$ .

9. Будь-який елемент конструкції повинен містити як мінімум 10% шарів альтернативних напрямків ( $\pm 45^\circ$ ,  $90^\circ$  і  $0^\circ$ ) - це запобігає безпосередньому навантаженню матриці в цих напрямках.

10. У місцях механічних з'єднань використовувати принаймні  $40\% \pm 45^\circ$  шарів для збільшення міцності на зминання. Також міцність на зминання механічного кріплення можна збільшити за рахунок локального збільшення товщини в місці кріплення.

11. Розміри комірок сотового заповнювача повинні бути достатньо малі для запобігання "зминання" обшивок протягом затвердження при нормальному тиску.

12. Не рекомендується застосовувати соти з алюмінію в сотових конструкціях з вуглепластиковими несучими шарами через можливе виникнення електрохімічної корозії:

- якщо алюмінієві соти повинні бути використані по критеріям міцності, вони повинні бути ізольовані від вуглецевих шарів;
- вони не повинні застосовуватися, якщо є небезпека ураження блискавкою.

13. Переходи товщини в симетричному і збалансованому ламінаті

## **Висновки до розділу 2**

Вибір методу неруйнівного контролю деталі з композитного матеріалу, як шаруваті матеріали, литі вироби і вузли, можуть обстежитися з використанням простих процедур, що включають вимір розмірів і допусків, визначення мас і щільності, визначення затвердіння шляхом вимірювання твердості, візуального огляду на наявність дефектів, обстукування з метою визначення пористості. Якщо для цілісності вузла необхідно провести більш повний контроль, це можна виконати за допомогою різних методів неруйнуючих випробувань. Крім того, обсяг неруйнуючих випробувань на деталях з композитного матеріалу залежить від того, чи є деталь основною конструкцією, що впливає на безпеку польоту, або другорядною конструкцією, що не впливає на безпеку польоту. Тип або клас деталі, як правило, визначений на конструкторському кресленні.

Відповідно до ASTM E2533-21 - Стандартний посібник з неруйнівного контролю полімерних матричних композитів, що використовуються в аерокосмічних додатках.

## РОЗДІЛ 3

### МАТЕРІАЛИ ТА ОЦІНКА ЯКОСТІ ДОСЛІДЖУВАНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

#### **3.1 Використання діаграми Ісікави при оцінці якості виробів з композиційних матеріалів**

Діаграма Ісікави дає можливість виявити ключові параметри процесів, що впливають на характеристики виробів, встановити причини проблем процесу або фактори, що впливають на виникнення дефекту в виробі. У тому випадку, коли над вирішенням проблеми працює група фахівців, причинно-наслідкова діаграма допомагає групі досягти загального розуміння проблеми. Також, за допомогою діаграми Ісікави можна зрозуміти, яких даних, відомостей або знань про проблему бракує для її вирішення і тим самим скоротити область прийняття необґрунтованих рішень. Коли будується діаграма Ісікави, причини проблем розподіляють по ключовим категоріям. В якості таких категорій виступають - людина, методи роботи (дій), механізми, матеріал, контроль і навколишнє середовище. Кількість категорій при побудові діаграми можна зменшувати в залежності від проблеми, що розглядається.

Всі причини, пов'язані з досліджуваною проблемою деталізуються в рамках цих категорій:

- причини, пов'язані з людиною включають в себе фактори, обумовлені станом і можливостями людини. Наприклад, це кваліфікація людини, його фізичний стан, досвід та ін.
- причини, пов'язані з методом роботи містять в собі те, яким чином, виконується робота, а також все, що пов'язано з продуктивністю і точністю виконуваних операцій процесу або дій.
- причини, пов'язані з механізмами - це всі фактори, які обумовлені обладнанням, машинами, пристроями, використовуваними при виконанні дій. Наприклад, стан інструменту, стан пристосувань і т.п.

➤ причини, пов'язані з матеріалом - це всі фактори, які визначають властивості матеріалу в процесі виконання роботи. Наприклад, теплопровідність матеріалу, в'язкість або твердість матеріалу.

➤ причини, пов'язані з контролем - це всі фактори, що впливають на достовірне розпізнавання помилки виконання дій.

➤ причини, пов'язані з зовнішнім середовищем - це всі фактори, що визначають вплив зовнішнього середовища на виконання дій. Наприклад, температура, освітленість, вологість і т.п.

Діаграму Ісікави можна поділити наступним чином:

1. Визначається потенційна або існуюча проблема, яка потребує вирішення. Формулювання проблеми розміщується в прямокутнику з правого боку аркуша паперу. Від прямокутника вліво проводиться горизонтальна лінія.

2. По краях листа з лівого боку позначаються ключові категорії причин, що впливають на досліджувану проблему. Кількість категорій може змінюватися в залежності від проблеми, що розглядається. Як правило, використовуються п'ять або шість категорій з наведеного вище списку (людина, методи роботи, механізми, матеріал, контроль, навколишнє середовище).

3. Від назв кожної з категорій причин до центральної лінії проводяться похилі лінії. Вони будуть основними «гілками» діаграми Ісікава.

4. Причини проблеми, виявлені в ході «мозкового штурму», розподіляються за встановленими категоріями і вказуються на діаграмі у вигляді допоміжних «гілок», що примикають до основних «гілок».

5. Кожна з причин деталізується на складові. Для цього по кожній з них задається питання - «Чому це сталося»? Результати фіксуються у вигляді «гілок» наступного, більш низького порядку. Процес деталізації причин триває до тих пір, поки не буде знайдена «коренева» причина.

6. Виявляються найбільш значущі і важливі фактори, що впливають на досліджувану проблему. За значущими причинами проводиться подальша робота, і визначаються коригувальні або попереджувальні заходи.

Для встановлення зв'язку між результатами і причиною (дефектом і фактором, що впливає на його утворення) використовують схему причинно-наслідкових зв'язків.

Одним з варіантів такої схеми є «схема Ісікава», запропонована професором Токійського університету Ісікава Каору (рис. 3.1). При побудові такої схеми явища (фактори), що впливають на характеристику продукції прямо або побічно, зображують у вигляді стрілок, спрямованих до центральної лінії - результату. При детальному поданні чинників схема має вигляд гіллястого дерева.

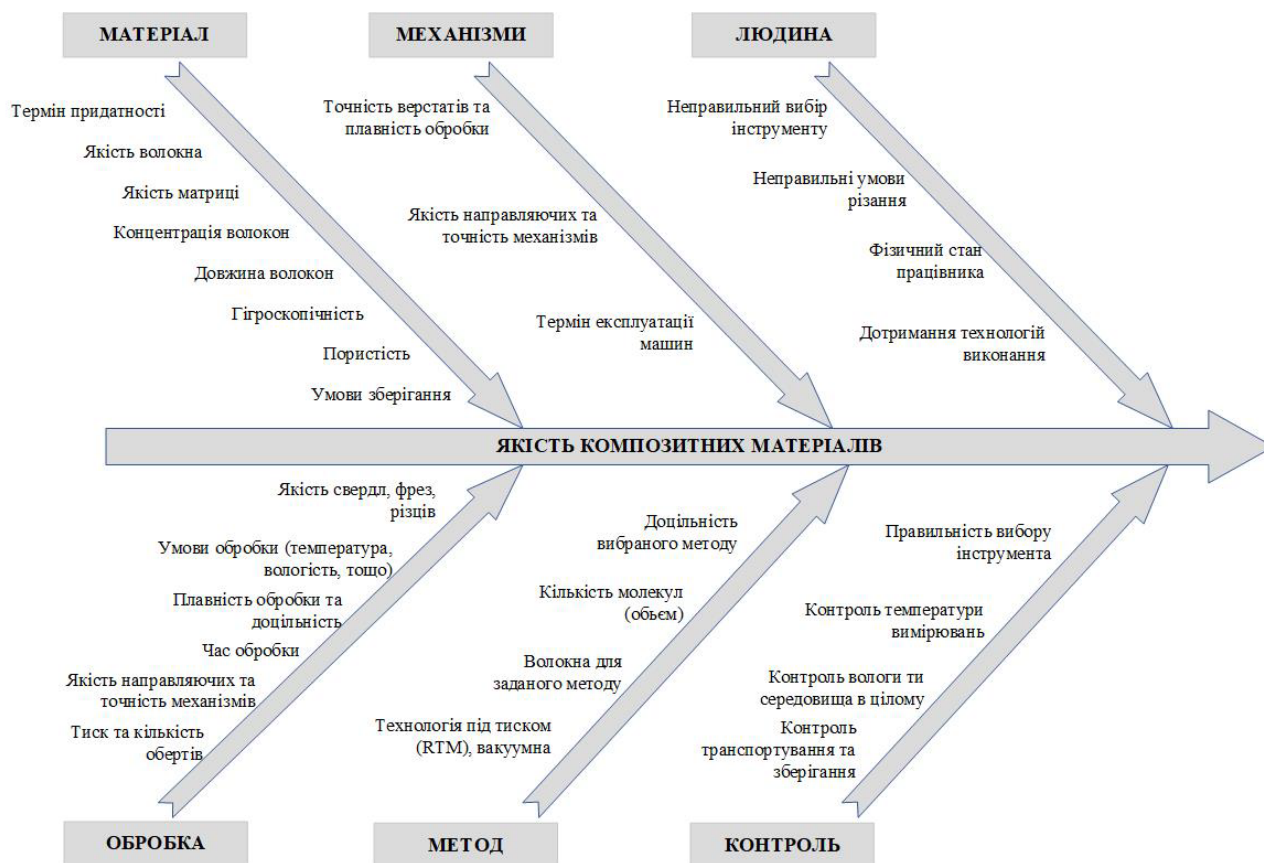


Рис. 3.1. Діаграма Ісікави якості композитних матеріалів

Діаграма Ісікава побудована для визначення причин нерівномірної товщини покриття, що наноситься гальванічним способом на металеві деталі.

Досліджувана проблема - нерівномірність товщини покриття. Причини розподіляються за шістьма ключовими категоріями - людина, метод, матеріал, механізми, контроль, обробка.

Переваги Діаграма Ісікава:

- дозволяє графічно відобразити взаємозв'язок досліджуваної проблеми і причин, що впливають на цю проблему;
- дає можливість провести змістовний аналіз ланцюжка взаємопов'язаних факторів, що впливають на проблему;
- зручна і проста для застосування і розуміння персоналом. Для роботи з діаграмою Ісікава не потрібна висока кваліфікація співробітників, і немає необхідності проводити тривале навчання.

До недоліків відносять складність правильного визначення взаємозв'язку досліджуваної проблеми і причин в разі, якщо досліджувана проблема є комплексною, тобто є складовою частиною більш складної проблеми.

Наприклад, для технічного обслуговування (ремонт) конкретного типу повітряного судна, відповідно до вимог льотної придатності, необхідно використовувати спеціалізоване обладнання та інструмент, матеріали, що застосовуються, повинні проходити спеціальні перевірки, кваліфікація і кількість персоналу повинні забезпечувати всі види діяльності. Важливими є оцінки статистичної міцності і живучості конструкції, в процесі яких не тільки виявляються місця ймовірного пошкодження, але і режими його розвитку. У цьому випадку важливим є вибір методів неруйнівного контролю.

Накопичений досвід застосування ПКМ (рис. 3.3 та 3.4) у конструкціях цивільних літаків ДП «АНТОНОВ» дозволяють констатувати, що ефективність критеріїв технологічної роботи ( $K_{ТР}$ ) і технологічних процесів ( $K_{ТП}$ ) для виробів із ПКМ визначається наступними критеріями:

$K_{КТР}$  – критерій, що описує конструктивно-технологічне рішення й технологічність конструкції;

$K_{ТПП}$  – критерій обсягу (складності) технологічної підготовки виробництва для виробів із ПКМ;

$K_{ТР}$  – критерій трудомісткості перетворення напівфабрикату в конструкцію;



$K_{авт.}$  - критерій ступеня автоматизації технологічного процесу;

$K_{в}$  – критерій вартості, що визначає інтегральні фінансові витрати на створення одиниці маси конструкції із ПКМ;

$K_{б}$  – критерій безпеки, що визначає ступінь відсутності шкідливих впливів на оператора й навколишнє середовище в процесі виготовлення й експлуатації конструкції із ПКМ;

$K_{тех}$  – критерій технологічності конструкції із ПКМ.

Рівень критеріїв формується певними факторами й визначається ними (рис.3.2).

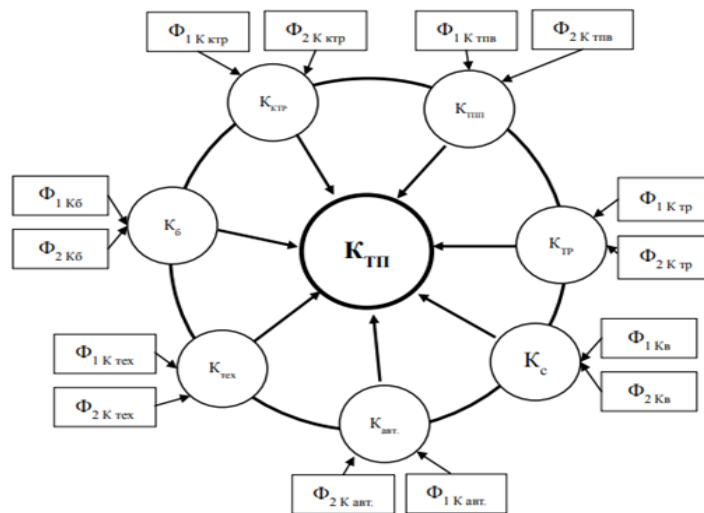


Рис. 3.2. Взаємозв'язок критеріїв ефективності технологічних процесів

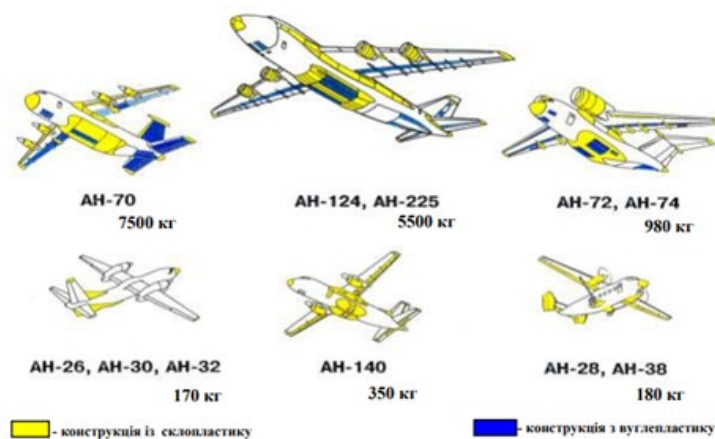


Рис. 3.3. Ілюстрація місць та обсягів застосуванням ПКМ в літаках ДП «АНТОНОВ»



Рис. 3.4. Використання полімерних композиційних матеріалів в конструкції літака АН-70

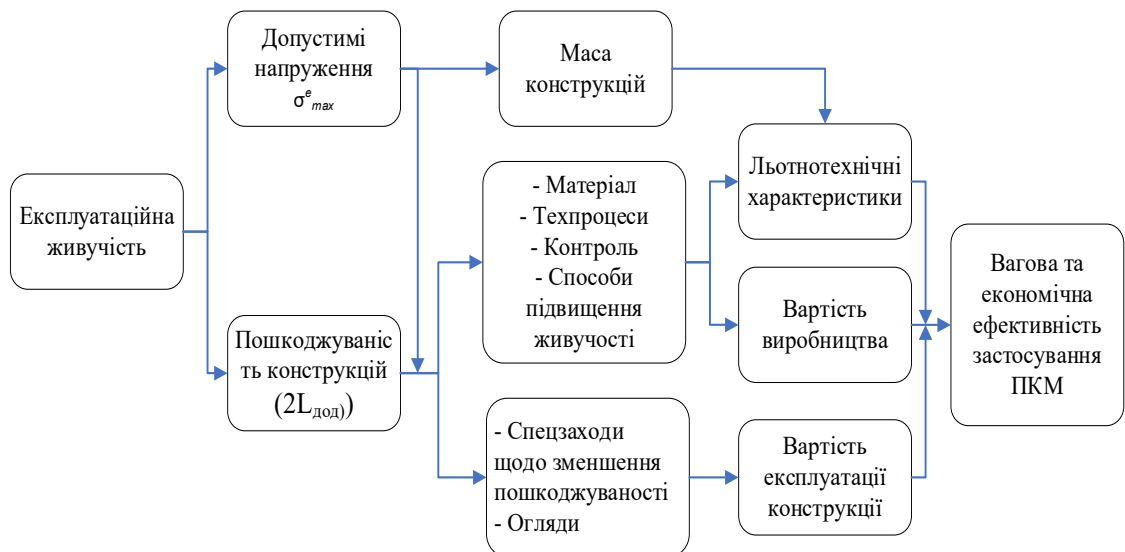


Рис. 3.5. Загальна схема підвищення ефективності застосування ПКМ

### 3.1. Оцінка якості полімерного композиційного матеріалу за критерієм міцності

Якістю матеріалу при моделюванні та синтезі керують за допомогою варіювання рецептурно-технологічних факторів, вибір яких залежить від

знань про матеріал і технологію, фактичні можливості управління виробництвом (рівня техніки). В роботі [9] наводяться ієрархічні структури мікро-, мезо- та макрорівнів структури КМ (рис. 3.6). При «переході» на наступний структурний рівень (до нового матеріалу) оптимізовані рецептури та технологія попереднього рівня удосконалюються. Тому послідовне поєднання рівнів (від мікро- до макроструктури) вимагає виділення критеріїв (властивостей), які забезпечують отримання якісного композиційного матеріалу лише на рівні макроструктури (продукту технології).

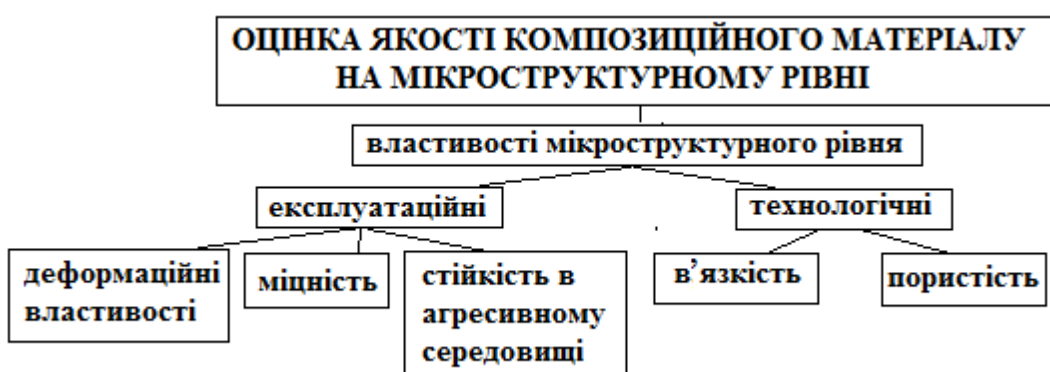


Рис. 3.6. Оцінка якості композиційного матеріалу на мікроструктурному рівні

Більшість конструктивних елементів зазнають навантажень у різних напрямках - розтяг, стиск, вигин та ін. Зокрема, нижня обшивка крила літака навантажена розтягуванням із крученням, а верхня - стисненням із зсувом. Таким чином, для отримання позитивного ефекту при застосуванні елементів з КМ, деталі конструкції необхідно армувати так, щоб максимально використовувати властивості міцності вздовж волокон і максимально виключити роботу матеріалу поперек волокон. Оскільки міцність КМ вздовж волокон відрізняються від його властивостей поперек волокон, тому що у першому випадку працюють в основному волокна, а в другому – сполучник, необхідно застосовувати схеми комбінованого армування для підвищення механічних властивостей виробу.

Армований композит – це конструкційний матеріал, який має

щонайменше дві окремі складові. Армуючі компоненти забезпечують міцність і жорсткість, в той час як оточуючий сполучник підтримує армування і забезпечує технологічність виробу. Полімерний сполучник також захищає волокна від впливу механічних пошкоджень та вологи. Односпрямовані волокна надають анізотропних властивостей композиту і придатні в експлуатації в зонах впливу високого напруження. Ефективність армування з односпрямованих волокон теоретично 100 %, якщо їхній напрямок укладання збігається з напрямком діючих сил. Це означає, що армуючі властивості можуть бути досягнуті в одному напрямку. Також можна досягти значної переваги в зниженні ваги готового виробу. Наприклад, змінюючи кут нахилу намотування та орієнтацію волокна, можна досягти високої механічної стійкості виробу та зниження його ваги до 72 % [10].

При переході від безперервних волокон до дискретних частина довжини кожного волокна не сприйматиме повного навантаження. Чим коротше армуюче волокно, тим менша його ефективність. При довжині волокон менше критичної довжини ( $l_{кр}$ ), матриця за жодних обставин не може передати волокну напругу, достатню для його руйнування. З цього випливає, що армуюча здатність коротких волокон (збільшення пружноміцності полімеру) дуже невисока. Особливо якщо зважити на орієнтацію волокон, яка в таких матеріалах не буває ідеальною. Структура матеріалів на основі коротких волокон переважно хаотична. Перевага коротковолокнистих наповнювачів визначається можливістю високошвидкісної переробки матеріалів виробів. Однак у процесі лиття чи екструзії відбувається додаткове руйнування волокон, довжина яких зазвичай зменшується до критичної та становить 0,1-1 мм.

Наведемо приклади впливу кута укладання армуючих волокон при виготовленні валу з полімерних композиційних матеріалів на їх механічні характеристики. Використовуючи армовані волокном КМ, можна вибирати відповідне орієнтування укладання волокон у приводному валу, завдяки чому значення модуля пружності при згинанні буде більшим. Крім того, мала

відносна щільність композитів призводить до бажаного модуля пружності, що збільшує критичну швидкість обертання валів [11]. Щоб збільшити власну частоту та модуль пружності у поздовжньому напрямку валу, волокна мають бути орієнтовані під кутом 0 градусів. Привідний вал втрачає 38 % своєї власної частоти, коли вуглецеві волокна орієнтовані у напрямку під кутом 90 замість 0 градусів [12].

Мета роботи полягала в оцінці впливу кута укладання шарів однонаправленої вуглецевої тканини на міцність перехресно-армованого КМ.

Досліджуваний матеріал - перехресно-армований КМ, виготовлений з однонаправленої вуглецевої тканини SkyCarbon (табл. 3.1) і полімерного епоксидно-дианового сполучника КДА (ТУ 2225-032-00203306-97), модифікованого аліфатичною епоксидною смолою марки ДЭГ-1. Форма зразків відповідає стандарту ASTM D3039 / D3039M-00 (Стандарт на метод визначення механічних властивостей при випробуванні на розтяг КМ з полімерною матрицею) (рис. 3.7).

Таблиця 3.1

Властивості вуглецевого волокна в однонаправленій тканині SkyCarbon

№	Характеристика	Значення
1	Межа міцності	4137 МПа
2	Модуль пружності	242 ГПа
3	Подовження	1,5%
4	Діаметр волокна	7.2 мкм
5	Лінійна щільність	270 м/кг

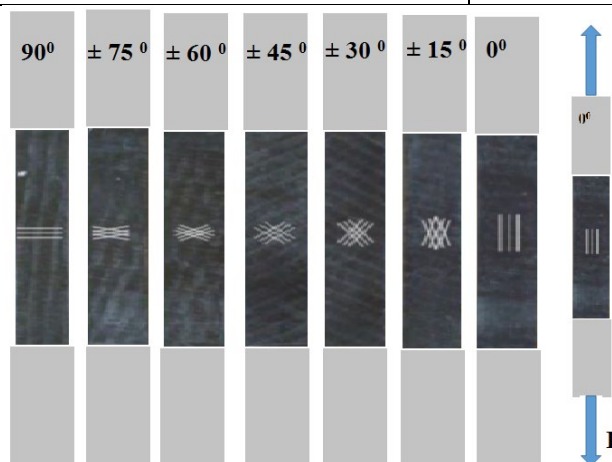


Рис. 3.7. Форма досліджуваних зразків та кут укладання шарів вуглецевої тканини.

За результатами випробувань зразків на розтяг зафіксована величина зусилля на зразок ( $P$ ), що призводить до його руйнування, представлена на рис. 3.8, де  $\Delta$  - переміщення захоплень розривної машини.

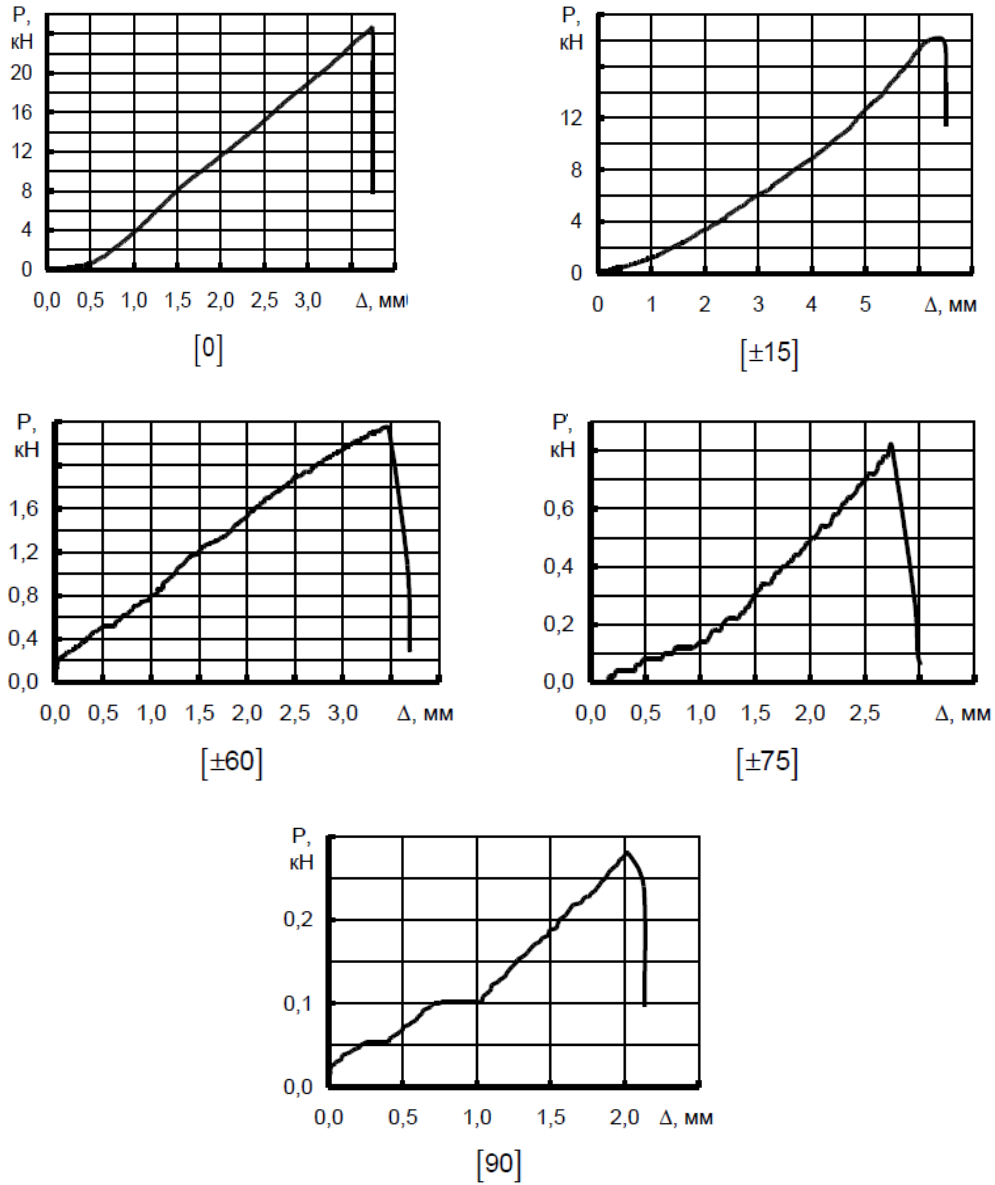


Рис. 3.8. Діаграми розтягу зразків.

З наведених графіків (рис.3.8) за максимальним значенням руйнівного навантаження для кожного кута укладання обчислюємо межу міцності при розтягуванні  $\sigma_{розт}$ :

$$\sigma_{розт} = \frac{P_p}{S} \text{ [МПа]} \quad (3.1)$$

Одержані результати представлено в таблиці 3.2 та на рис. 3.9

Таблиця 3.2

Експериментальна оцінка межі міцності при розтягу

Параметри	Кут укладання ( $\phi$ ) в досліджуваному зразку						
	$0^{\circ}$	$\pm 15^{\circ}$	$\pm 30^{\circ}$	$\pm 45^{\circ}$	$\pm 60^{\circ}$	$\pm 75^{\circ}$	$90^{\circ}$
Довжина L, мм	250	251	250	252	252	251	250
Ширина b, мм	23	24	25	25	24	24	25
Товщина $\delta$ , мм	2,5	2,55	2,6	2,5	2,55	2,5	2,4
Площа поперечного перетину, S, мм <sup>2</sup>	57,5	61,2	65,0	62,5	61,2	60,0	60,0
Руйнівне навантаження, $P_p$ , Н	24300	18400	8500	2760	2380	830	258
Межа міцності при розтягу, $\sigma_{розт}$ , МПа	423	301	131	44	39	14	4

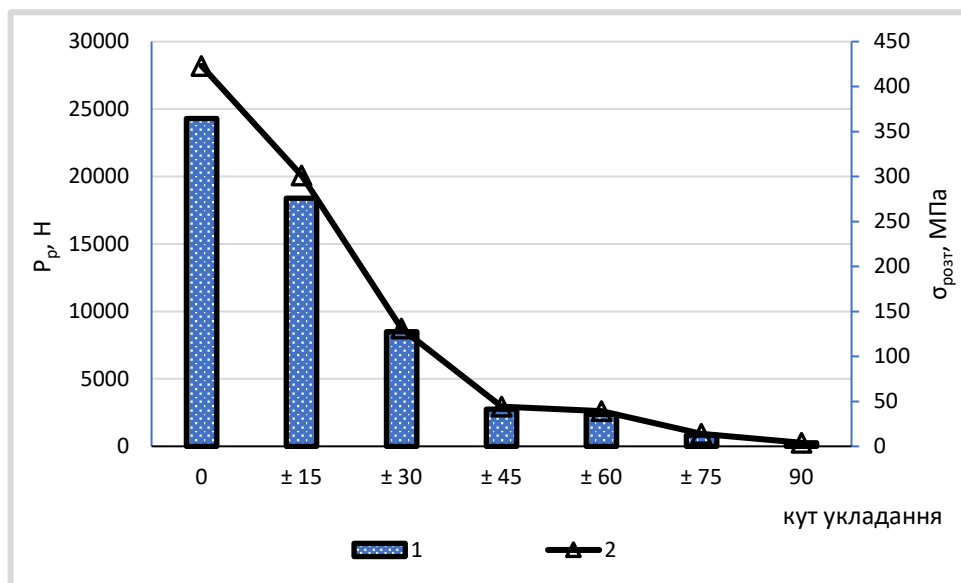


Рис. 3.9. Міцнісні характеристики перехресно-армованого композиційного матеріалу: 1 – руйнівне навантаження ( $P_p$ ), 2 – межа міцності при розтягуванні ( $\sigma_{розт}$ ).

За одержаними експериментальними значеннями руйнівного навантаження встановлено, що перехресно-армований КМ характеризується найвищою міцністю при куті укладання  $0$  градусів в напрямку прикладеного

навантаження, зростання кута укладання армуючих вуглеволокон до  $90^{\circ}$  призводить до зниження руйнівного навантаження в 95 разів.

Таким чином, залежно від кута укладання проявляється анізотропія міцності КМ. Мінімальний кут укладання, який має меншу розбіжність з напрямком прикладання сили, призводить до зниження руйнівного навантаження в 1,3 рази.

Оцінка руйнівного навантаження при  $90^{\circ}$  укладання свідчить про розривну міцність сполучника КДА, яка знижується в 1,4 рази, згідно нормам, встановлених в ТУ. Імовірно, це обумовлено адгезійною взаємодією активних епоксидних груп сполучника з поверхнею вуглеволокон в процесі формування КМ, що призводить до неоднорідності розподілу епоксидних груп в КМ – найбільша їх щільність проявляється на межі армуюче волокно-сполучник, найнижча – в основі сполучника.

### **Висновки до розділу 3**

У будь-яких галузях промисловості однією з основних завдань є зниження собівартості виробництва без втрати якості виробів та зниження витрат при подальшій експлуатації виробу. Безумовно, високотехнологічні композитні матеріали не економічніші за сталь або алюмінієвий сплав, проте їм не потрібний захист від корозії.

Головна перевага будь-якого композиту - це можливість при проектуванні самостійно вибрати тип матеріалу, орієнтацію та об'ємний вміст волокон. Це дозволяє отримувати конструкційні матеріали з бажаними для конструктора функціональними властивостями і робить використання композиційних матеріалів дуже цінним і перспективним напрямом у різних галузях промисловості: авіа- і двигунобудуванні, машинобудуванні, енергетиці, нафтогазовій та будівельній.

Таким чином, змінюючи кут укладання армуючого матеріалу залежно від передбаченого напрямку дії прикладеного навантаження можна досягнути



високої міцності КМ в процесі твердіння, однак експлуатаційні умови застосування КМ, як правило, передбачають різновекторність прикладання діючого навантаження, що передбачає необхідність створення умов експерименту, максимально наближених до реальних умов експлуатації виробу.

## РОЗДІЛ 4

### ВПЛИВ ЧИННИКІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

#### 4.1 Вплив епоксидних смол на людину

Речовини, що виділяються з епоксидних смол володіють токсичною дією на нервову систему та печінку. Епоксидні смоли мають здатність викликати захворювання шкіри (дерматит, екземи), алергічну ознаку при вдиханні низьких концентрацій пари.

При дотриманні техніки безпеки епоксидні смоли не є шкідливими для організму людини. При досягненні температури нагріву 60 °C і вище епоксидних смол можуть виділятися леткі речовини, серед основних це:

- епіхлоргідрин;
- толуол;
- ацетон;
- етилендіамін.

Епіхлоргідрин легко всмоктується через непошкоджену шкіру, викликає подразнення шкіри і слизових оболонок очей, тяжкі зміни в бронхах, легенях і нирках, негативно впливає на судинну систему, що викликає підвищення кров'яного тиску.

Пари толуолу діють наркотично, при тривалій дії на організм пригнічує кровотворення, подразнює шкіру і слизові оболонки.

Ацетон проникаючи в організм людини головним чином крізь дихальні шляхи діє як наркотик.

Етилендіамін при надлишку в повітрі робочої зони подразнює шкіру та викликає подразнюючу дію на верхні дихальні шляхи. Також пари етилендіаміну викликають гострі запалення верхніх дихальних шляхів, бронхіти, бронхіальну астму, екзему і роздратування шкіри, уражають печінку.

## **4.2. Основні правила техніки безпеки з композитними матеріалами на виробництві**

Згідно НПАОП 25.0-1.02-13 роботодавець зобов'язаний забезпечити безпечну та надійну експлуатацію виробничих споруд.

Відповідно ГОСТ 12.1.007-76 "ССБТ Шкідливі речовини. Класифікація і загальні вимоги безпеки" гранично допустима концентрація етилендіаміну в повітрі виробничих приміщень  $2 \text{ мг/м}^3$ . Тому персонал який працює з епоксидними смолами та клеями в виробничих приміщеннях необхідно щоб було передбачено загально обмінну припливно-витяжну та місцеву витяжну (від джерел зосереджених виділень) механічну вентиляцію.

Встановлюють за необхідності струмопровідні зони для зняття зарядів статичної електрики з персоналу.

Робочі місця та проходи не повинні захарашуватися іншими деталями які можуть заважати в роботі.

Перед початком роботи необхідно переконатися в справності блокувань, заземлення окремих вузлів і частин, електро-, пневмошлангових установок, у наявності засобів пожежогасіння.

Включення нагрівачів камери сушіння зв'язуючого здійснюється тільки при працюючій системі вентиляції і при закритих дверях камери.

Обов'язково необхідно перевіряти заземлення транспортерів наповнювача, препрегів, направляючих і віджимних валків, надійність ізоляції кабелю високої напруги та рухомих шлангів електро- і пневмомережі.

Механічну обробку необхідно проводити на верстатах, обладнаних відсмоктувальними пристроями. У разі використання устаткування, яке не укомплектоване пиловідсмоктувальним пристроєм, слід вжити заходів щодо оснащення його місцевим відсмоктувачем. Якщо деталі виходять за межі устаткування то потрібно встановлювати переносне огороження.

#### **Висновки до розділу 4**

Виробництво епоксидних смол (ЕС) при не дотриманні правил з охорони праці та охорони навколишнього середовища спричиняє негативний вплив, так як епоксидні сполуки, містять від 1 до 10 % летких домішок, які інтенсивно виділяються при нагріванні (до 80 — 100 °С) смол і композитів на їх основі в процесі одержання і переробки.

Слід відмітити основні небезпечні речовин такі як епіхлоргідрин, толуол, фенол, анілін, формальдегід, етилендіамін та ін..

Захист робітників у межах приміщень робочих зони досягається за рахунок використання витяжних вентиляції та забезпечення робітників спецодягом та засобами індивідуального захисту.

Захист навколишнього середовища від забруднень виробництва епоксидних сполук в місцях виробництва досягається шляхом використання новітніх систем очищення повітря від парів органічних речовин, серед яких найбільш поширеними є поглинання (активоване вугілля), скрубери (поглинання в рідину), біоочищення, каталітичне, фотокаталітичне, газорозрядно-каталітичне очищення та шляхом нормування державними органами викидів шкідливих речовин в атмосферу.

## ВИСНОВКИ

Метою створення композиційного матеріалу є поєднання схожих або різних компонентів для отримання матеріалу з новими заданими властивостями та характеристиками, відмінними від властивостей та характеристик вихідних компонентів. Більшість властивостей отриманих КМ виявляються вищими, ніж властивості вихідних компонентів. З появою такого роду матеріалів виникла можливість селективного вибору властивостей композитів, необхідних потреб кожної конкретної галузі застосування.

Композиційні матеріали надають можливість створення авіаційних деталей з підвищеними характеристиками до зносостійкості та тріщиностійкості так як ці деталі піддаються величезним навантаженням в процесі експлуатації авіаційних транспортних засобів.

Проведений аналіз композиційних матеріалів у виробках авіаційної техніки надає можливість до прогнозування властивостей вже готового виробу. Для забезпечення ефективного удосконалення процесу оцінки якості виробів з композиційних матеріалів були вивчені основні чинники процесу формування якісних ознак виробів з КМ.

Розглянута система забезпечення якості виробів з КМ за вимогами міжнародних (ІСО, ІКАО) та національних стандартів.

Розглянуті основні методи неруйнівного контролю та побудована класифікація за допомогою яких можливо виконувати пошук дефектів в авіаційних деталях з КМ.

Розглянуто та побудовано класифікацію дефектів, що дозволяє сформулювати наступні рекомендації для подальшого попередження недопущення дефектів у процесі виробництва деталей КМ в авіаційній техніці.

Проведена оцінка причин появи виробничих дефектів композитів та запропонована діаграма Ісікави причинно-наслідкових зв'язків технологічного процесу виготовлення виробів з композиційних матеріалів.

Запропоновані алгоритми зв'язків завдяки яким підвищується виявлення

ключових параметрів, характеристик та технологічних процесів, що впливають на якість виробів та безпеку експлуатації повітряних суден.

За результатами механічних випробувань перехресно-армованого композиційного матеріалу, виготовленого з однонаправленої вуглецевої тканини SkyCarbon, на розтяг встановлена найвища міцність при куті укладання 0 градусів в напрямку прикладеного навантаження, зростання кута укладання армуючих вуглеволокон до 900 призводить до зниження руйнівного навантаження в 95 разів.

## СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Nedelcu R., Redon P. Composites materials for aviation industry / International conference of scientific paper AFASES 2012, Brasov, 24-26 May 2012. – P. 11-13.
2. Bachmann J., Yi X., Gong H. *et al.* Outlook on ecologically improved composites for aviation interior and secondary structures / *CEAS Aeronaut J.* – 2018. – **9**. – С. 533–543.
3. Ключников Ю. В., Сердітов О. Т., Дубнюк В. Л. Авіаційні матеріали та їх технології: навч. посібник / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2022. – 114с.
4. Андреев А.В., Петропольский В.С. Оптимизация выбора материала мастер-моделей для изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) в условиях единичного и опытного производства в изделиях авиационной техники / А.В. Андреев, В.С. Петропольский // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2(82). – Харьков: НАКУ, 2015. – С. 20-29.
5. Тарасюк А.Д., Андреев А.В., Артаков А.Ю. Влияние автоматизации технологических процессов производства деталей из полимерных композитов на качественные и экономические характеристики изделий / А.Д. Тарасюк, А.В. Андреев, А.Ю. Артаков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(83). – Харьков: НАКУ, 2015. – С. 7-16.
6. Коцюба А.А. Формирование критерия эффективности проектирования конструкций гражданских самолетов из полимерных композитов на этапе выбора их состава / А.А. Коцюба // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (87).– Х., 2016.

– С. 19 – 31

7. Разработка комплексного критерия рационального выбора полимерных композиционных материалов/ Гайдачук А.В., Wang Bo, Бычков С.А, Андреев А.В.// Фізико-хімічна механіка матеріалів: сб. науч. тр. Физикомеханического института им. Г.В. Карпенко НАН Украины. – Том 55, №6. – Л., 2019. С. 110-118.

8. Крысин В.Н. Технологическая подготовка производства самолетов. – М.: Машиностроение, 1984. – 200 с

9. Bormotov A., Proshin A., Korolev E. and others. Methodological principles of the development and quality control of special-purpose building materials / The Journal «Scientific Israel – Technological Advantages». – 2002. - 3–4. – P. 178 – 185.

10. Khoshnavan M.R., Paykani A. Design of Composite Drive Shaft and its Coupling for Automotive Application / Journal of Applied Research and Technology. - 2012. - Vol. 10. - P. 826-834.

11. Lee D.G, Kim H.S, Kim J.W, Kim J.K. Design and manufacture of automotive hybrid aluminum/composite drive shaft / Composite Structures. - 2004. - Vol. 63. - P. 87-99.

12. Xu F.J., Ye J.R., Xue Y.D. Design and mechanical analysis of a hybrid composite drives haft / Composite Structure. - 1991. - Vol. 9. - P. 207–216.

13. ДСТУ ISO 9000-2007 «Системи управління якістю. Основні положення та словник»

14. ДСТУ EN ISO 9712:2014 «Неруйнуючий контроль. «Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю» стандарт встановлює вимоги до кваліфікації та сертифікації персоналу, який здійснює неруйнівний контроль.

15. ДСТУ EN 4179:2017 «Аерокосмічна серія. Кваліфікація і атестація персоналу для неруйнівного контролю (EN 4179:2017, IDT)»

16. ДСТУ EN 13018:2017 «Неразрушающий контроль. Визуальный контроль. Общие принципы (EN 13018:2016, IDT)»



17. ДСТУ EN ISO 3452-1:2014 «Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 1. Загальні принципи»
18. ДСТУ EN ISO 9934-1:2018 «Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 1. Загальні вимоги»
19. ДСТУ ISO 15549:2015 «Неруйнівний контроль. Вихрострумний контроль. Загальні вимоги»
20. ДСТУ EN ISO 20339:2018 «Неруйнівний контроль. Обладнання для вихрострумного обстеження. Характеристики і верифікація матричних перетворювачів»
21. ДСТУ EN ISO 15708-2:2019 «Неруйнівний контроль. Радіаційні методи комп'ютерної томографії. Частина 2. Принципи, обладнання та зразки»
22. ДСТУ EN ISO 16810:2016 «Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Загальні вимоги»
23. ДСТУ EN ISO 17405:2017 «Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Методика контролю покриттів, нанесених наплавленням, катанням та детонаційним напилюванням»
24. ДСТУ EN ISO 16826:2015 «Неруйнівний контроль. Ультразвукове вимірювання товщини»
25. ДСТУ EN 17119:2019 «Неруйнівний контроль. Термографічний контроль. Активна термографія»
26. ДСТУ EN 13554:2016 «Неруйнівний контроль. Акустико-емісійний контроль. Загальні вимоги»
27. ДСТУ EN ISO 18081:2019 «Неруйнівний контроль. Акустико-емісійний контроль. Виявлення витоків за допомогою акустичної емісії»
28. ДСТУ EN ISO 20485:2019 «Неруйнівний контроль. Контроль герметичності. Метод індикаторного газу»
29. ASTM D3039/D3039M-08 «Стандартний метод випробування властивостей на розтяг композитних матеріалів з полімерною матрицею»
30. В.П. Кашицький, М.Д. Мельничук, О.Л. Садова; за заг. ред. П.П. Савчука. / Композитні та порошкові матеріали: навчальний посібник / П.П.

Савчук, – Луцьк. 2017. 368 с.

31. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» в дипломних проектах і роботах. Для студентів всіх спеціальностей освітньокваліфікаційних рівнів «спеціаліст» та «магістр»./ Укладачі: О.І. Запорожець, А. В. Русаловський. -К.,2011. – 30 с.

32. НПАОП 25.0-1.02-13 «Правила охорони праці під час роботи з полімерними композитними матеріалами».

33. ДСТУ 2293-99 «Охорона праці».

34. ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».