МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет
(повне найменування факультету)
Фізичне матеріалознавство
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)
магістр
(ступінь вищої освіти)

на тему Дослідження процесу формування композитного матеріалу з матрицею із епоксидної смол та армувальних скляних волокон
(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) 2 курсу, групи ІФ- 213м

Спеціальності 132 Матеріалознавство
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Прикладне матеріалознавство

КОСЕНКО Р.О.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ВІНІЧЕНКО В.С.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)
Рецензент МІТЯЄВ О.А.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Інженерно-фізичний факультет
Кафедра Фізичне матеріалознавство
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність _132 Матеріалознавство_____
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство_____
(назва освітньої програми (спеціалізації)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ФМ

_____
«_____» _____20___року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

_____КОСЕНКО Роман Олексійович_____
(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Дослідження процесу формування композитного матеріалу з матрицею із епоксидної смол та армувальних скляних волокон.
керівник проєкту (роботи) доцент, к.т.н ВІНІЧЕНКО Валерій Степанович
(науковий ступінь, вчене звання, ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)
затверджені наказом закладу вищої освіти від «28» _жовтня_2024_ року №434
2. Строк подання студентом проєкту (роботи)
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) композитний матеріал з матрицею із епоксидної смоли та армувальних скляних волокон_____
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Літературний огляд, матеріали та методика, експериментальна частина, розрахунок економічної ефективності, охорона праці, висновки_____
_____
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)
Композитні матеріали; Скловолокно як армувальний компонент; Матриця; Намотування; Схеми формування; Термокомпресійне формування; Типовий графік нагріву під час формування; Залежність напруження втрати герметичності склопластикових труб від типу та кількості модифікатору в зв'язних.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	ВІНІЧЕНКО В.С., доцент, к.т.н.		
2	ВІНІЧЕНКО В.С., доцент, к.т.н.		
3	ВІНІЧЕНКО В.С., доцент, к.т.н.		
4	КРУГЛІКОВА В.О, доцент, к.т.н		
5	НЕСТЕРОВ О.В., доцент, к.т.н		
НК	ГРЕШТА В.Л., професор, к.т.н		

7. Дата видачі завдання «10» жовтня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Літературний огляд	11.10.2024	
2	Матеріали та методика досліджень	16.10.2024	
3	Експериментальна частина	04.11.2024	
4	Економіко-організаційна частина	22.11.2024	
5	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	29.11.2024	
	Висновки	26.12.2024	

Студент(ка) _____ Роман КОСЕНКО
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи) _____ Валерій ВІНІЧЕНКО
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 115 с., 16 табл., 34 рис., 9 додатків, 35 джер.

КОМПОЗИТНИЙ МАТЕРІАЛ, ЕПОКСИДНА СМОЛА, СКЛОВОЛОКНО, НАМОТУВАННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ, ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Мета дослідження полягає у встановленні закономірностей формування структури та властивостей композитного матеріалу на основі епоксидної смоли, армованої скляними волокнами, та розробці оптимізованих технологічних параметрів його виготовлення.

Об’єкт дослідження – процес формування композитного матеріалу з матрицею із епоксидної смоли та армувальних скляних волокон.

В роботі досліджено процес формування композитного матеріалу з матрицею із епоксидної смоли, армованої скляними волокнами. Визначено оптимальні параметри технологічного процесу та встановлено їх вплив на експлуатаційні характеристики готового матеріалу. Розроблено технологічні рекомендації щодо виготовлення композитних виробів методом намотування. Проведено порівняльний аналіз економічної ефективності використання розробленого композитного матеріалу порівняно з традиційними матеріалами. Результати досліджень впроваджено у виробництво композитних труб, що підтвердило практичну цінність розробленої технології.

ЗМІСТ

С.

Вступ 7
1 Літературний огляд 8
1.1 Визначення та класифікація композитних матеріалів. 8
1.2 Властивості композитних матеріалів 17
1.3 Характеристика епоксидних смол як матеріалу матриці 20
1.4 Скляні волокна як армувальний компонент 27
2 Матеріали та методика досліджень 34
2.1 Характеристика використаних матеріалів 34
2.1.1 Епоксидна смола LH 289 34
2.1.2 Склоровінг для армування 37
2.2 Методи визначення механічних властивостей та визначення кількості наповнювача ПКМ 39
3 Експериментальна частина 43
3.1 Визначення типу намотування 43
3.2 Формування виробів з армованих пластиків 47
3.2.1 Контактне формування 50
3.2.2 Пресове формування 54
3.2.3 Пневмогидрокомпресійне формування 56
3.2.4 Термокомпресійне формування 59
3.2.5 Магнітоімпульсне формування 60
3.2.6 Просочування заготовок 62
3.3 Температурний режим формування 64
3.4 Залежність експлуатаційних характеристик склопластикових виробів від технології їх виготовлення 66
4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях 72
4.1 Аналіз потенційних небезпек 72

4.2 Заходи забезпечення безпеки 74
4.3 Заходи з виробничої санітарії 77
4.4 Заходи з пожежної безпеки 79
4.5 Заходи безпеки в умовах НС 80
5 Економіко-організаційна частина 86
5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу 86
5.2 Послідовний аналіз 87
Висновок 100
Перелік джерел посилань 102
Додаток А 106

ВСТУП

В сучасному світі композитні матеріали відіграють визначну роль у розвитку різних галузей промисловості, від авіакосмічної до будівельної. Особливе місце серед них займають композити на основі епоксидних смол, армованих скляними волокнами, які поєднують високу міцність, хімічну стійкість та відносно низьку вартість виробництва.

Розвиток технологій виготовлення композитних матеріалів та зростаючі вимоги до їх експлуатаційних характеристик зумовлюють необхідність детального дослідження процесів їх формування. Особливо важливим є розуміння механізмів взаємодії між епоксидною матрицею та скляними волокнами, що безпосередньо впливає на фізико-механічні властивості кінцевого продукту.

Метою роботи є дослідження закономірностей формування структури та властивостей композитного матеріалу на основі епоксидної смоли, армованої скляними волокнами, та розробка рекомендацій щодо оптимізації технологічного процесу його виготовлення.

Методи дослідження базуються на комплексному використанні сучасних фізико-хімічних методів аналізу, включаючи електронну мікроскопію, рентгеноструктурний аналіз, термічний аналіз та механічні випробування.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні нових закономірностей формування структури композиту та розробці оптимізованих режимів його виготовлення.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості їх використання для вдосконалення існуючих технологій виробництва композитних матеріалів та розробки нових композицій з поліпшеними експлуатаційними характеристиками.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Визначення та класифікація композитних матеріалів.

У науковій літературі не існує загальноприйнятого визначення композитних матеріалів, і наявні дефініції суттєво різняться. Проте беззаперечним є той факт, що композитні матеріали складаються щонайменше з двох різних фаз. Запропоноване нижче визначення охоплює широкий спектр багатофазних матеріалів, водночас виключаючи традиційні багатофазні матеріали.

Композитні матеріали являють собою комбінацію двох або більше матеріалів, поєднаних таким чином, щоб досягти певних покращених або бажаних властивостей (рис. 1.1). У композиті дисперсна фаза (фази) розподілена в безперервному середовищі, що називається матрицею. Принциповою умовою є збереження дисперсною фазою своєї початкової ідентичності після обробки та/або під час експлуатації/повторної обробки [1-3].

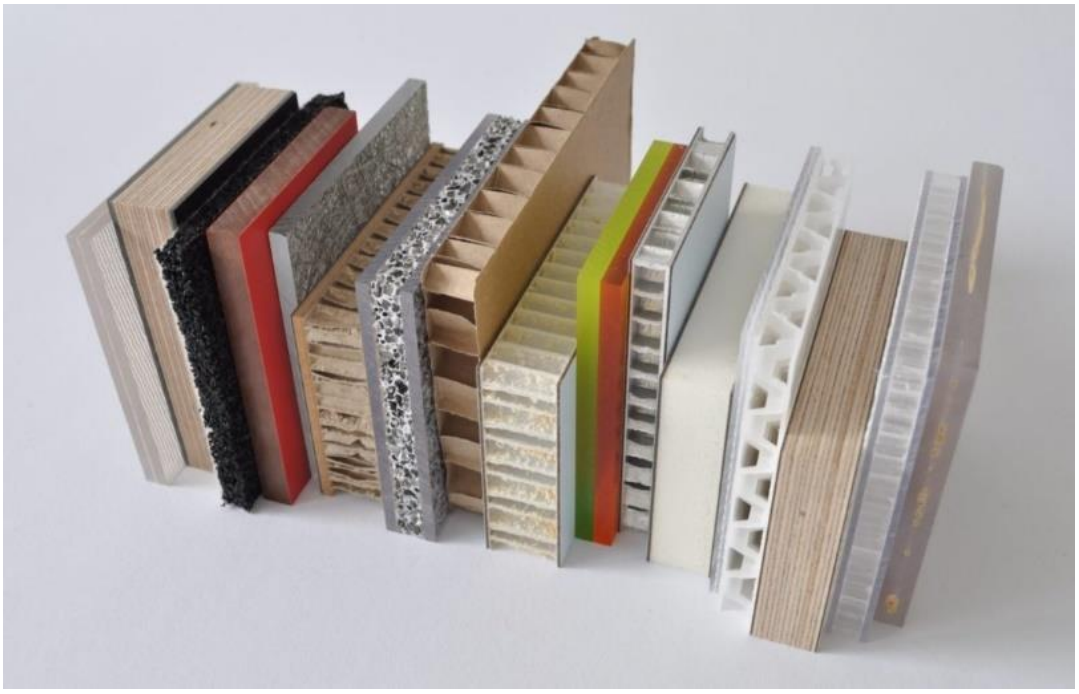


Рисунок 1.1 – Композитні матеріали

Для ілюстрації цього визначення можна навести простий приклад. Полімерні матеріали відомі своєю доброю технологічністю та низькою вартістю. Однак їх застосування у навантажених конструкціях обмежене через незадовільні механічні властивості. Модуль Юнга полімерів становить лише кілька ГПа, а міцність зазвичай не перевищує 50 МПа. Натомість синтетичні волокна, зокрема скловолокно, характеризуються високими механічними показниками: модуль пружності близько 70 ГПа, а міцність сягає 3000 МПа. Композит, створений із скловолокна (наприклад, 50% за об'ємом) та полімеру, демонструє покращені механічні властивості: модуль пружності перевищує 30 ГПа, а міцність - 1000 МПа. Такий композитний матеріал придатний для використання в навантажених конструкціях.

Наведене визначення композитного матеріалу охоплює як природні композити, так і композити in situ. Фактично, всі природні композити є композитами in situ, де зміцнювальна фаза формується під час утворення матричної фази. Це визначення виключає дисперсійно-зміцнені сплави та інші багатофазні сплави, оскільки дисперсна фаза в них нестабільна під час експлуатації [2-6].

Властивості композитів є функцією властивостей складових компонентів, їх відносного вмісту, геометрії, розподілу та орієнтації дисперсної фази. Визначальними факторами є властивості та відносна кількість компонентів. Сучасний ринок матеріалів пропонує численні матеріали з різноманітними властивостями, що уможливлює досягнення бажаних характеристик у кінцевому композиті шляхом правильного підбору матеріалів та їх оптимального співвідношення.

Композити можна умовно поділити на природні та синтетичні. Прикладами природних композитів є деревина, кістка тощо. Деревина - це композит, виготовлений з міцних і гнучких целюлозних волокон у лігніновій матриці. Складовими кістки є тверді та крихкі пластинки гідроксиапатиту і міцний, але м'який білок, який називається колаген. Хоча ці компоненти присутні в природних композитах у дрібному масштабі, дуже складно

пристосувати властивості природних композитів до своїх потреб. Синтетичні композити - це штучні композити. У синтетичних композитах існує достатня гнучкість у виборі відповідного армування і матриці з широкого спектру армуючих речовин і матриць, щоб можна було виготовити композити з бажаними властивостями.

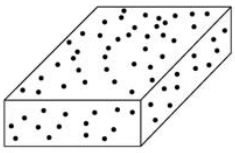
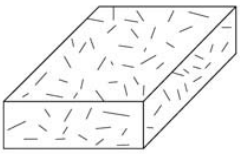
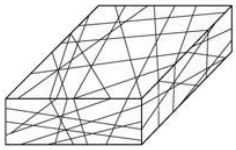
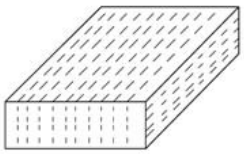
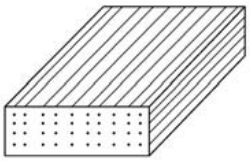
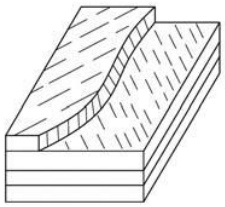
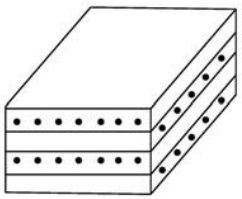
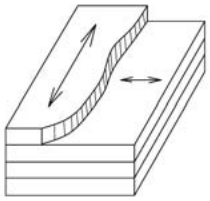
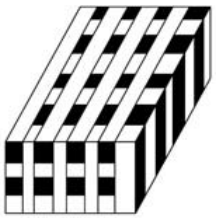
Залежно від дисперсної фази, композити можна класифікувати на композити, армовані волокнами (ВК), і композити з частинок (рис. 1.2, табл. 1.1) [2-4]. ВК можуть бути виготовлені як одношарові або багатошарові композити. Коли шари в багатошаровому композиті виготовлені з одного типу волоконного армування, то він називається «ламінат». Якщо в різних шарах використовуються два або більше типів армуючих волокон, то це гібридний композит.

Рисунок 1.2 – Класифікація композитів залежно від армування

В одношарових композитах весь композит буде мати один шар. Сюди також відносяться композити, що мають однакову орієнтацію і властивості в кожному шарі. Довгі або короткі волокна використовуються як армування в одношарових композитах. Завдяки волокнистому армуванню можлива краща передача навантаження і, отже, реалізуються високі механічні властивості.

Однак властивості не однакові у всіх напрямках. Зазвичай, механічні властивості є високими вздовж напрямку волокон. Ізотропні композити можуть бути легко виготовлені з короткими волокнами. Під час обробки волокна можуть вирівнюватися в певному напрямку в деяких методах обробки, і тоді композити стають анізотропними. Однак у більшості випадків композити є ізотропними, коли в якості армування використовуються короткі волокна [7-9].

Таблиця 1.1 – Схеми армування [8]

Схеми армування	Види армуючих елементів			
	Рівновісні частинки	Дискретні волокна	Неперервні волокна	Плівки
Хаотична				–
Одномірна	–			
Двомірна	–			
Тримірна	–	–		–

Гібридні композити виготовляються з двома або більше типами армування. Зазвичай вони виготовляються зі скловолокна/вуглецю, скловолокна/араміду та араміду/вуглецю. Нещодавньою розробкою є гібридні

композити зі скла та натуральних волокон. Гібридні композити використовують переваги властивостей або особливостей кожного типу армування. Наприклад, у гібридному композиті скло/вуглець враховується низька вартість скловолокна і високі модулі вуглецевого волокна, щоб сформувати композит з низькою вартістю і високими модулями. Гібридні композити можуть бути виготовлені з чергуванням шарів двох типів волокон, з одним шаром другого типу в середній площині або з додаванням другого типу волокна в окремих ділянках. Аналогічно, гібридні вуглець/арамідні композити мають підвищений модуль пружності та міцність на стиск порівняно з повністю арамідними композитами і підвищену в'язкість порівняно з повністю вуглецевими композитами. Коефіцієнт термічного розширення (КТР) кожного типу волокон у гібридному композиті потребує ретельного вивчення, щоб гарантувати, що під час затвердіння в ламінаті не виникне високе внутрішнє напруження.

Віскери - це монокристалічні, короткі волокна з надзвичайно високою міцністю. Діаметр віскерів коливається від 0,1 до декількох мікрометрів. Міцність майже близька до теоретичної через відсутність кристалічних недосконалостей, таких як дислокації. Отже, за допомогою віскерів можна значно підвищити міцність матеріалу матриці. Однак, перед використанням віскерів необхідно вирішити деякі питання. Більшість віскерів є дорогими. Крім того, важко і часто непрактично рівномірно ввести їх у матрицю. Поводження з вусиками є проблемою через їхню тонку природу. Вирівнювання в матриці - ще одна проблема. Деякі з них класифікуються як канцерогенні матеріали. Якщо немає особливої потреби, віскери рідко використовуються [10].

Частинки - це майже рівновимірні матеріали. Вони не покращують міцність матриці в більшості композитів на основі частинок. Отже, називати їх підсилювачами недоречно. Є кілька винятків: дуже дрібні частинки в металевій матриці можуть підвищити міцність, перешкоджаючи руху дислокацій, а тверді частинки можуть зупинити поширення тріщин і

підвищити міцність кераміки. Частинки додають переважно для модифікації певних фізичних властивостей матриці, таких як функціональні або термічні властивості. Наприклад, частинки додають до полімерів, щоб зменшити вартість продукту і збільшити модуль пружності. Однак це збільшення є набагато меншим, ніж передбачено правилом сумішей для безперервних ВК у напрямку волокон. На рисунку 1.3 показано модуль Юнга композитів як функцію об'ємної частки армування для різних форм армування, а саме: безперервне волокно, віскер та частинки. Слід зазначити, що ефективність армування знижується від безперервного волокна до частинок.

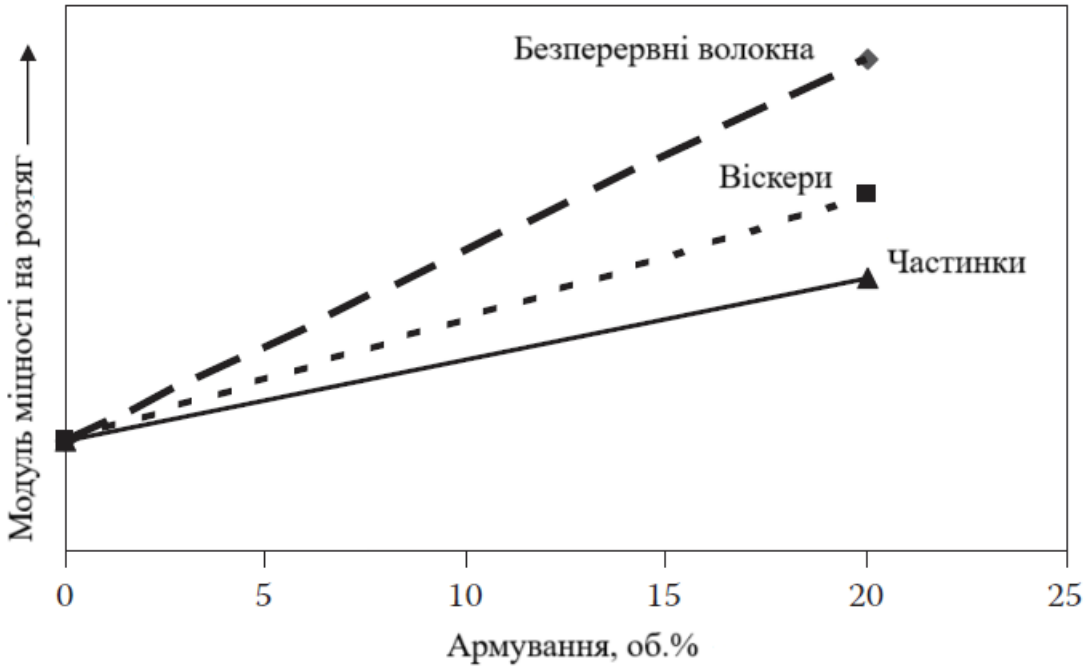


Рисунок 1.3 – Модулі розтягування як функція об'ємної частки армування для композитів, армованих безперервним волокном, віскером та дисперсними частинками [11]

Залежно від матеріалу матриці композити поділяються на полімерні композиційні матеріали (ПКМ), композити з металевою матрицею (КММ) та композити з керамічною матрицею (КМК). Класифікація композитів на основі матеріалу матриці показана на рисунку 1.4. Ці три типи композитів

відрізняються за методом виготовлення, механічними властивостями та функціональними характеристиками. Оскільки матеріали матриці зазнають фізичних або хімічних змін, метод обробки, який використовується для виготовлення композитів, має безпосередній вплив на матричну систему, що використовується. Температура, при якій обробляються матеріали матриці, визначає вибір дисперсної фази, оскільки армування не повинно зазнавати жодних хімічних реакцій або фізичних змін, а також не повинно змінювати свої властивості. Температурний рівень, при якому можна використовувати той чи інший композит, визначається термостійкістю матеріалу матриці [10, 11].

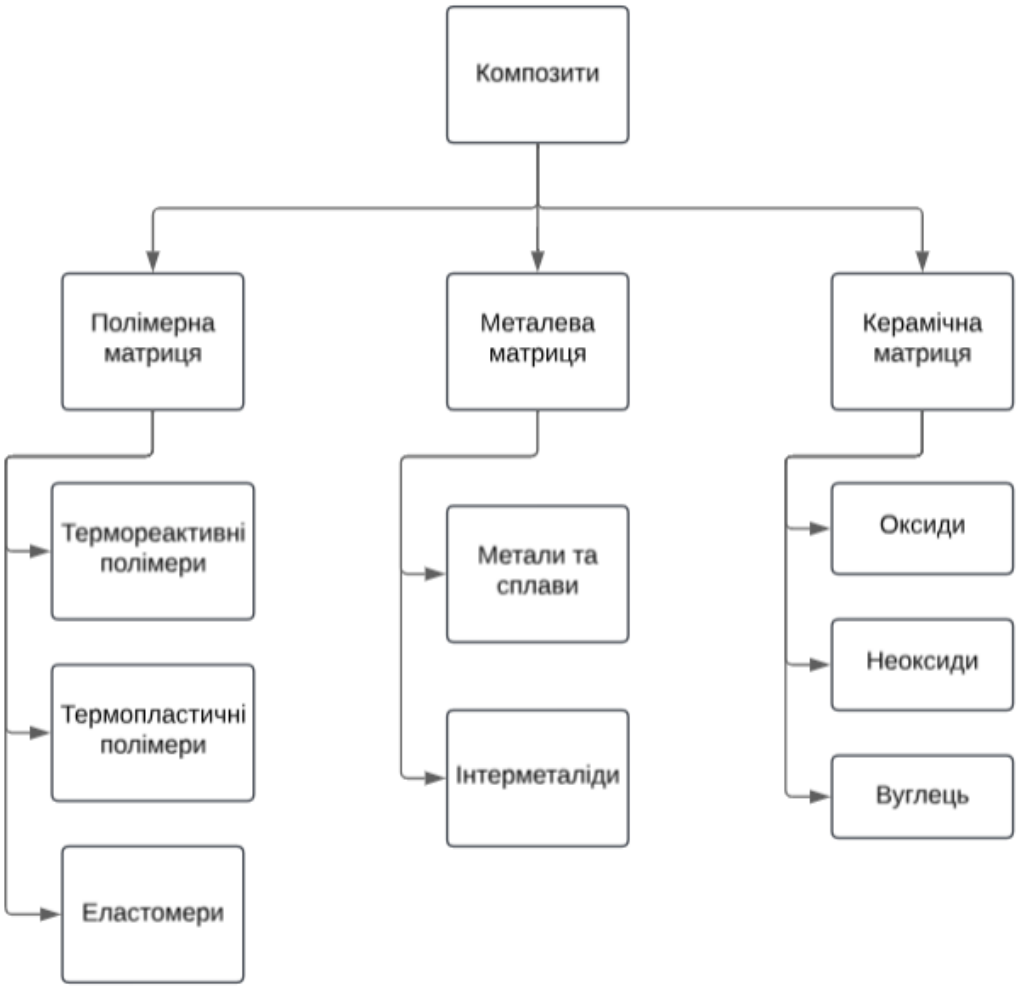


Рисунок 1.4 – Класифікація композитних матеріалів за типом матриці [11]

Матеріалом матриці може бути термореактивний полімер, термопластичний полімер або еластомер в ПКМ. Термореактивні полімери дуже часто використовуються через перевагу в переробці. В даний час термопластичні полімери набувають все більшого значення через їх відносно високі показники в'язкості і можливість подальшої обробки. Для задоволення конкретних вимог до властивостей існує широкий вибір термопластичних полімерів. ПКМ підходять для виготовлення виробів, які використовуються при температурі навколишнього середовища. Існують спеціальні полімери, які можна використовувати при температурі до 250°C. У будь-якому випадку, ПКМ не підходять для застосувань, де робоча температура перевищує 350°C. Успіх ПКМ, що значною мірою замінюють метали, зумовлений значно кращими механічними властивостями композитів порівняно з пластиковими матричними матеріалами. Хороші механічні властивості композитів є наслідком використання високоміцного і високомодульного армування волокнами [7-10].

Метали або металеві сплави використовуються як матеріал матриці в металевих композиційних матеріалів (МКМ). В основному використовуються легкі метали та сплави, такі як алюміній, титан та їхні сплави. У деяких спеціальних застосуваннях використовуються важкі метали, такі як мідь і кобальт. МКМ можуть бути придатними для застосування, де робоча температура сягає 1200°C. В даний час в якості дисперсної фази в основному використовуються короткі волокна або тверді частинки через переваги в обробці. Метали та сплави також армують безперервними волокнами для значного підвищення модуля пружності та міцності. Основною проблемою для МКМ є корозія.

Більшість МКМ все ще перебувають на стадії розробки, і лише деякі компоненти виробляються на комерційній основі. Останнім часом інтерес до МКМ зосередився на транспортних застосуваннях і, відповідно, МКМ на основі легких металів, зокрема, алюмінію та його сплавів, привертають найбільшу увагу. Відносно низький модуль Юнга алюмінію та його сплавів

можна значно покращити шляхом введення армування. Метали і сплави за своєю природою мають хорошу пластичність і в'язкість. Армування покращує модуль Юнга, але за рахунок пластичності [7, 8].

Багато оксидних і неоксидних керамічних матеріалів використовуються як матричні матеріали в ПКМ. ПКМ корисні для високотемпературного використання, де робочі температури перевищують 1200°C. Ці матеріали дуже дорогі, оскільки більшість ПКМ обробляються при високій температурі. У деяких випадках для отримання якісного продукту необхідно застосовувати високий тиск при такій високій температурі.

Залежно від розміру дисперсної фази, композити можна класифікувати на макрокомпозити, мікрокомпозити та нанокомпозити. Розмір дисперсної фази в макрокомпозитах знаходиться на рівні міліметру. Найкращим прикладом макрокомпозиту є бетон. Бетон складається з цементу, піску та гравію. Мікрокомпозити складаються з дисперсної фази на рівні мікрометру. Більшість композитів, що використовуються в даний час, є мікрокомпозитами. Склопластик і вуглепластик є одними з найпоширеніших прикладів. У нанокомпозитах принаймні один розмір дисперсної фази знаходиться на нанометровому рівні. Типові приклади нанокомпозитів - пластмаси, армовані вуглецевими нанотрубками, і пластмаси, армовані наноглиною. Мікро- та нанокомпозитні матеріали є неоднорідними на рівні дисперсної фази, але однорідними на макрорівні. Це означає, що на макрорівні вони поводяться як однокомпонентний матеріал.

Незалежно від типу композитного матеріалу, межа розділу фаз відіграє важливу роль у контролі властивостей. Компоненти композитів розділені чітко визначеними поверхнями розділу. Міцність міжфазного зв'язку дуже важлива для когерентної поведінки композитів. Більша міцність зв'язку забезпечується використанням сполучного агента та механічним зчепленням компонентів. Не завжди необхідно прагнути до досягнення максимальної міцності міжфазного зв'язку; у деяких випадках модифікована (адаптована) міжфазна границя виявляється більш ефективною, ніж сильний міжфазний

зв'язок. Для систем, що поглинають енергію, краще використовувати слабкий міжфазний зв'язок. Розшарування з подальшим витягуванням волокон поглинає багато енергії під час процесів руйнування в цих системах. Відхилення тріщини за рахунок зневуглецювання є ще одним важливим фактором, що сприяє підвищенню в'язкості руйнування [10].

1.2 Властивості композитних матеріалів

Властивості композиту є функцією властивостей складових фаз та їх взаємного розташування, розміру, форми, розподілу та орієнтації дисперсної фази. Ці характеристики проілюстровані на рисунку 1.5.

Співвідношення складових може бути виражене або ваговою часткою, або об'ємною часткою. Вагова частка має відношення до виробництва, а об'ємна частка зазвичай використовується в розрахунках властивостей. Вагова та об'ємна частки пов'язані між собою через густину (ρ).

$$W_r = \frac{\omega_r}{\omega_c} = \frac{r_r}{r_c} V_r \qquad (1.1)$$

де індекси r та c відносяться до армування та композиту, відповідно;

W і V – вагова та об'ємна частки, відповідно;

w – вага.

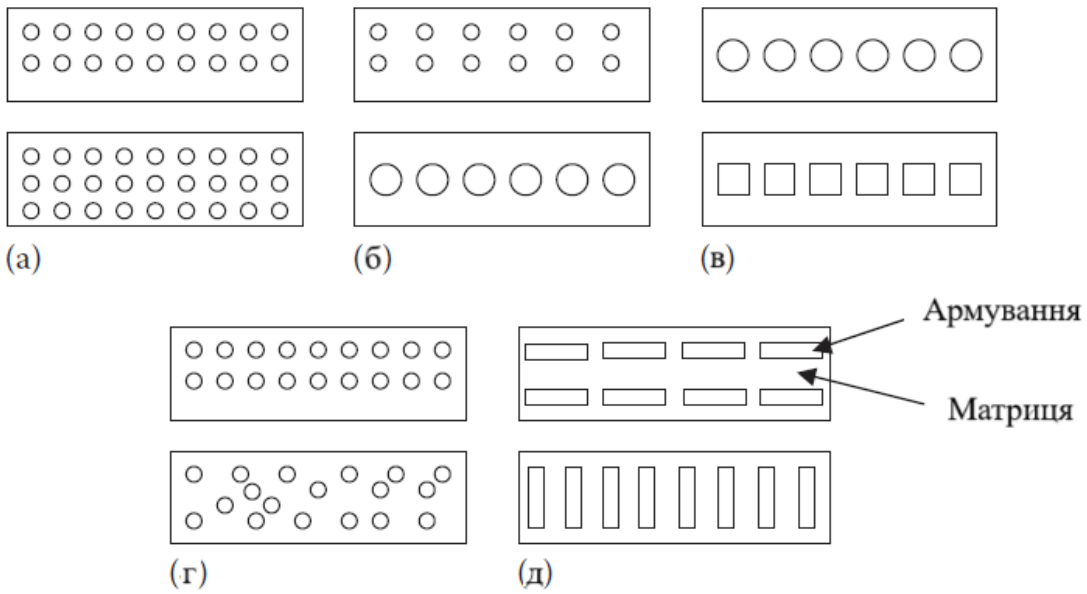
Аналогічно,

$$W_m = \frac{\omega_m}{\omega_c} = \frac{r_m}{r_c} V_r \qquad (1.2)$$

де індекс m позначає матрицю.

ρc можна визначити, якщо відомі або об'ємні частки, або вагові частки

компонентів.



а – концентрація, б – розмір, в – форма, г – розподіл; д – орієнтація

Рисунок 1.5 – Схема геометричних і просторових характеристик армування в композитах

Коли об'ємні частки складових відомі, то

$$r_c = r_r V_r + r_m V_m \tag{1.3}$$

Коли вагові частки складових відомі, то

$$\frac{1}{r_c} = \frac{W_r}{r_r} + \frac{W_m}{r_m} \tag{1.4}$$

Формула 1.3 показує густину композиту через об'ємну частку, скориговану на суму густин компонентів. Це рівняння стосується не лише густини, але, за певних умов, може бути застосоване і до інших властивостей композитів. Узагальнена форма рівняння має вигляд

$$X_c = X_r V_r + X_m V_m \quad (1.5)$$

де X – будь-яка конкретна властивість;

індекси c, r та m – композит, армування та матриця, відповідно.

Це рівняння відоме як правило сумішей або закон сумішей.

Розмір дисперсної фази також впливає на властивості композитів. Загалом, чим менший розмір, тим кращі механічні властивості через ефект розміру, тобто розмір дефекту обмежений, і він повинен бути меншим за розмір матеріалу. Міцність будь-якого матеріалу обернено пропорційна розміру дефекту. Площа поверхні матеріалу залежить від розміру та форми. Для будь-якого конкретного об'єму, менше армування має більшу площу поверхні. Зі збільшенням площі поверхні збільшується площа контакту між армуванням і матрицею, що призводить до покращення властивостей. Однак дуже складно виробляти безперервні волокна діаметром менше мікрометра. Дуже тонкі короткі волокна/вуса і частинки мають тенденцію до агломерації, і дуже важко отримати рівномірний розподіл.

В ідеалі композит повинен бути гомогенним, тобто мати рівномірний розподіл складових, але цього важко досягти під час виробництва. Гомогенність визначає, наскільки репрезентативний об'єм матеріалу може відрізнятися за фізико-механічними властивостями від середніх властивостей матеріалу. Нерівномірного розподілу слід уникати, наскільки це можливо, інакше різні ділянки композиту матимуть різні властивості. Ті властивості, які визначаються найслабшою частиною композиту, будуть знижені через неоднорідність системи. Наприклад, руйнування в неоднорідному композиті почнеться в зоні з найнижчою міцністю, що негативно вплине на загальну міцність композиту.

Орієнтація армування в певному напрямку в матриці впливає на ізотропні властивості композиту. Коли армування має форму рівноосьових частинок, композит поводиться по суті як ізотропний матеріал. Коли розміри

армування нерівномірні, композит може поводитися як ізотропний матеріал лише тоді, коли армування має випадкову орієнтацію.

У деяких випадках виробничий процес може спричинити орієнтацію армування і, отже, втрату ізотропності, тобто композит вважається анізотропним. У компонентах, виготовлених з безперервних склопластиків, таких як односпрямований або перехресний ламінат, анізотропія може бути бажаною, оскільки ламінат можна розташувати таким чином, щоб найвища міцність була вздовж напрямку максимальних експлуатаційних навантажень. Дійсно, основною перевагою цих композитів є можливість контролювати анізотропію шляхом проектування та виготовлення.

Більшість властивостей композитного матеріалу є комплексною дією інших факторів. Компоненти композиту зазвичай взаємодіють у синергетичний спосіб, визначаючи властивості композитів, які не можуть бути повністю враховані правилами сумішей. Хімічні та зв'язкові характеристики поверхні розділу фаз є особливо важливими для визначення властивостей композиту. Міцність міжфазного зв'язку повинна бути достатньою для передачі навантаження від матриці до волокон, і тільки тоді композит матиме кращу міцність, ніж неармована матриця. З іншого боку, якщо в'язкість композиту важливіша за міцність, то міжфазний зв'язок повинен легко руйнуватися, щоб запобігти механізмам зміцнення, таким як розшарування і витягування волокон [12].

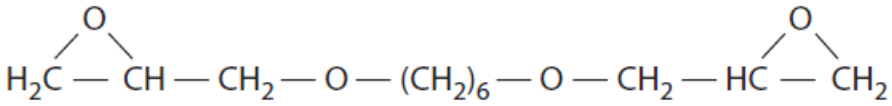
1.3 Характеристика епоксидних смол як матеріалу матриці

Оскільки в роботі досліджується процес формування композиційного матеріалу з матрицею із епоксидної смоли та армувальних скланих волокон, то необхідно докладніше визначити їх властивості.

Смоли, які містять епоксидну групу в своїй хімічній структурі, відомі як епоксидні смоли. Епоксидні групи, як правило, є тричленними кільцями з одного атома кисню і двох атомів вуглецю. Епоксидні смоли, доступні на ринку, мають дві або більше епоксидних груп у молекулі. Таким чином, ці смоли можуть утворювати поперечні зв'язки під час реакції затвердіння через епоксидні групи.

Епоксидні смоли реагують з багатьма сполуками і добре зчіплюються з різними типами матеріалів. Ці властивості зробили епоксидну смолу універсальним матеріалом для поверхневих покриттів і клеїв. Як і поліефірні смоли, епоксидні смоли також можуть бути виготовлені на замовлення для будь-якого конкретного застосування, оскільки існує безліч систем смол і затверджувачів (табл. 1.2).

Залежно від типу молекули, до якої приєднані епоксидні групи, епоксидні смоли можна класифікувати на аліфатичні та ароматичні епоксидні смоли. Аліфатичні діоли або поліоли реагують з епіхлоргідрином і утворюють аліфатичні епоксидні смоли (рис. 1.6). Ці смоли є більш гнучкими завдяки наявності довгого аліфатичного ланцюга між двома епоксидними групами. Тому ці смоли не підходять для виготовлення композитів. Однак ці смоли можна використовувати як розріджувачі та модифікатори для високов'язких ароматичних епоксидних смол. Епоксидована соєва олія та касторова олія також утворюють гнучкі продукти після затвердіння.



Дигліцидиловий ефір гександіолу

Рисунок 1.6 – Аліфатична епоксидна смола

Таблиця 1.2 – Типи ненасичених поліефірних смол [13]

Тип	Опис
1	2
Загального призначення	Стандартна тверда смола на основі ортофталевого ангідриду, малеїнового ангідриду та пропіленгліколю. Відносно хороші фізичні властивості. Застосовується для виготовлення різноманітних виробів, таких як піддони, човни, ванни та резервуари для води.
Низькопрофільний	Суміш поліефірної смоли та термопластичної добавки, наприклад, полістиролу або поліметилметакрилату. Мінімальні сліди від раковини, що утворюються завдяки диференційованій усадці між волокном і смолою. Може поставлятися як однокомпонентна смола, якщо термопласт сумісний з розчином поліефір/мономер.
Легко стабілізований	Містить поглиначі ультрафіолету. Відмінні зовнішні атмосферостійкі властивості, що характеризуються мінімальною зміною кольору під впливом сонячних променів. Використовується в гелевих покриттях, зовнішніх структурних панелях тощо.
Поверхневий	Містить віск або інші бар'єри, що уможливлюють затвердіння в присутності повітря. Може використовуватися на вертикальних поверхнях з додаванням тиксотропних добавок. Покриття стійкі до утворення плям і почервоніння у воді.
Хімічно стійкий	Має виняткову хімічну та водостійкість і використовується для виготовлення витяжних шаф, реакційних посудин і резервуарів.
Термостійкий	Високі температури деформації при нагріванні, вища міцність і жорсткість у гарячому стані. Триаллілціанурат використовується замість стиролу.
Стійкий	Підвищена в'язкість і ударна в'язкість. Деякі склади також мають хорошу гарячу міцність. Використовується в захисних шоломах, захисних кожухах, гелевих покриттях, а також в авіаційних і автомобільних деталях. Зазвичай використовується ізофталева кислота. Спочатку ізофталеву кислоту і гліколь змішують, а потім додають малеїновий ангідрид, щоб отримати поліефірні ланцюги з реакційноздатною ненасиченістю на кінцях.

Кінець таблиці 1.2

Вогнестійкий	Самозатухаюча, вогнестійка, помірна термостійкість і середня міцність. Смола готується з використанням галогенованих двоосновних кислот. Подальшого підвищення вогнестійкості можна досягти додаванням фосфатних ефірів і оксиду сурми. Використовується у виробництві витяжних шаф, електрообладнання та будівельних панелей.
Гнучкий	Низька твердість і висока гнучкість та подовження. Замість фталевого ангідриду використовується двоосновна кислота з прямим ланцюгом, наприклад, адипінова або себацинова. Використання діетиленгліколю замість пропіленгліколю також забезпечує гнучкість.

Ароматичні епоксидні смоли отримують шляхом реакції ароматичних сполук з епіхлоргідрином. Перші комерційні і найбільш широко використовувані епоксидні смоли - це продукти реакції епіхлоргідрину та бісфенолу А. В результаті реакції утворюється дигліцидиловий ефір бісфенолу А (ДГЕБА) – епоксидна смола (рис. 1.7). Смоли з вищою молекулярною масою використовуються як клеї та поверхневі покриття. Низькомолекулярні та низьков'язкі смоли зазвичай використовуються для виготовлення композитів [14].

Смоли Новолак виготовляються шляхом реакції епіхлоргідрину з фенолформальдегідом. Ці смоли після реакції з відповідним затверджувачем можуть утворювати продукт з високим показником твердості. Іншою важливою епоксидною смолою є тетрагліцидилдіамінодифенілметан. Ця смола також має властивість зберігати міцність при високій температурі. Ця смола затвердіває при високій температурі. Отже, ця смола може бути використана для виготовлення препрегів, необхідних для аерокосмічних застосувань. Обмеженнями цієї смоли є погані характеристики в гарячому і вологому стані, низькі значення деформації до руйнування і високе вологопоглинання. Високе вологопоглинання знижує температуру склування та механічні властивості.

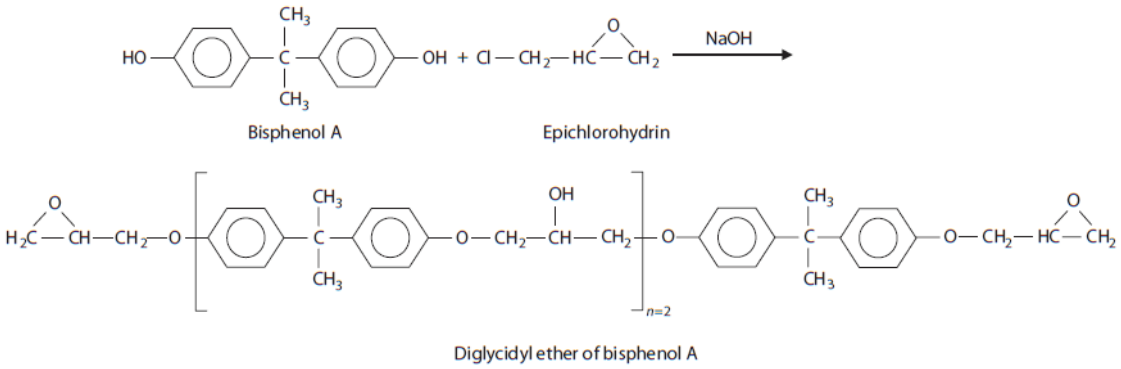


Рисунок 1.7 – Формування епоксидної смоли ДГЕБА [13]

Галогенозаміщений бісфенол використовується для приготування вогнезахисних епоксидних смол. Деякі смоли виготовляються шляхом змішування двох або трьох типів епоксидних смол відповідно до кінцевого застосування.

Епоксидні смоли мають наступні переваги перед іншими термореактивними смолами:

- Відсутність летючих речовин під час затвердіння
- Низька усадка при затвердінні
- Відмінна стійкість до хімічних речовин і розчинників
- Відмінна адгезія до різноманітних наповнювачів, волокон та інших речовин

Крихкість або низьке значення відношення деформації до руйнування є невід'ємною проблемою будь-якої високозшитої смоли, в тому числі епоксидної смоли. Покращення значення деформації до руйнування та в'язкості руйнування має важливе значення для створення стійких до пошкоджень композитів. Цього можна досягти шляхом додавання еластомерів до епоксидної смоли. Одним з широко використовуваних еластомерів для епоксидних смол є бутадієн-акрилонітрил з карбоксильною кінцівкою. Цей еластомер утворює другу фазу в затверділій матриці, що обмежує утворення мікротріщин. Хоча додавання еластомеру покращує в'язкість смоли, воно

знижує температуру склування, модуль пружності та стійкість до розчинників. Покращення в'язкості без погіршення інших властивостей можливе шляхом додавання термопластичного матеріалу. Однак рівномірний розподіл дуже дрібних термопластичних частинок/фази є складним завданням.

В'язкість смоли є важливим параметром для виготовлення композитів. Певною мірою в'язкість визначається хімічною структурою смоли. Аліфатичні епоксидні смоли з лінійними ланцюгами є малов'язкими рідинами. Вплив довжини ланцюга для діепоксидів незначний. Однак для поліепоксидних смол спостерігається збільшення в'язкості зі збільшенням довжини ланцюга.

Ароматичні епоксидні смоли з трьома або більше епоксидними групами на молекулу є напівтвердими або твердими при RT. В'язкі рідини отримують шляхом змішування цих епоксидних смол з ароматичними діепоксидними смолами. Як правило, будь-яка заміна ароматичних кілець зменшує в'язкість, але є деякі винятки.

Затверджувачі [14]

На відміну від поліефірної смоли, затверджувачі є зшиваючими групами для епоксидної смоли. Тип затверджувача також контролює кінцеві властивості затверділої епоксидної смоли. Існує багато затверджувачів, доступних на ринку. Ці затверджувачі можна умовно розділити на три категорії на основі реакційноздатної функціональної групи. Це аміни, кислотні ангідриди та кислотні затверджувачі.

Аліфатичні аміни є першими затверджувачами, що використовуються для епоксидних смол. Ці аміни затверджують смолу при високій температурі. Властивості кінцевого продукту залежать від довжини ланцюга затверджувача. Гнучкість кінцевого продукту підвищується при використанні довголанцюгових затверджувачів. Деякі з комерційно використовуваних аліфатичних амінів - діетилентриамін (ДЕТА), триетилентетрамін (ТЕТА), тетраетиленпентамін (ТЕПА) і дициандіамід (ДІЦД). ДІЦД є гарячим затверджувачем і затверджує епоксидну смолу при 120°C. Цей затверджувач

підходить для компонентів, що вимагають тривалого часу виготовлення, а також для виготовлення препрегів.

Ароматичні аміни є широко використовуваними затверджувачами для епоксидних смол. Деякі з них – м-фенілендіамін (МФДА), 4,4'-метилендіанілін (МДА) і діамінодифенілсульфон. Ці аміни дуже повільно реагують при ТПВ і потребують нагрівання для швидкого і повного затвердіння. Затверділі продукти мають хорошу стійкість до лугів і розчинників і кращі механічні властивості, ніж продукти, затверділі аліфатичними амінами. Ці затверджувачі, як правило, є твердими речовинами при високій температурі, а також мають погану розчинність. Зазвичай смолу нагрівають приблизно до 80°C, щоб розчинити необхідну кількість затверджувача.

Затверджувачі на основі кислотного ангідриду можуть створювати продукти з високим значенням твердості при стисненні. Ці сполуки гігроскопічні за своєю природою і повинні зберігатися в герметичних контейнерах, щоб уникнути поглинання вологи. Ці затверджувачі також потребують високої температури для затвердіння епоксидної смоли, а отримані продукти мають температуру розкладання до 200°C. Зазвичай для збільшення швидкості реакції використовують прискорювачі. При затвердінні ангідриди утворюють складні ефірні зв'язки з епоксидними групами, і ці зв'язки стабільні в органічних кислотах і деяких неорганічних кислотах. Однак ці зв'язки гідролізуються в присутності лугів. Найпоширенішими кислотними ангідридними затверджувачами є фталевий ангідрид, гексагідрофталевий ангідрид, метиловий ангідрид надиру, тримеліловий ангідрид, малеїновий ангідрид і бурштиновий ангідрид.

Для повного затвердіння епоксидної смоли необхідно додати стехіометричну кількість затверджувача. Ця кількість залежить від еквівалентної маси епоксидної смоли і затверджувача. Еквівалентна вага епоксидної смоли визначається як вага смоли в грамах, що містить одну епоксидну групу на молекулу. У випадку епоксидних смол на основі

дигліцидилового ефіру (що містять дві епоксидні групи в молекулі), епоксидна еквівалентна вага становить половину середньої молекулярної ваги.

Амінна еквівалентна вага залежить від кількості амінних гідрогенів. Отже, еквівалентна вага аміну - це відношення молекулярної маси аміну до кількості амінних гідрогенів у молекулі. Аналогічно, еквівалентна вага ангідриду - це відношення молекулярної маси ангідриду до кількості ангідридних груп, наявних у молекулі. Для повного затвердіння необхідно змішати один еквівалент затверджувача з одним еквівалентом епоксидної смоли.

Фізичні властивості та хімічна стійкість епоксидних смол залежать від ступеня затвердіння. Дуже важко досягти 100% затвердіння, оскільки деякі групи, що не прореагували, завжди залишаються в затверділому матеріалі. Крім того, важко кількісно визначити ступінь затвердіння. Однак ступінь затвердіння можна пов'язати з властивостями. Гнучкість і показник твердості затверділого продукту є індикаторами ступеня затвердіння [13-15].

1.4 Скляні волокна як армувальний компонент

Скляні волокна є найбільш широко використовуваними волокнистими армуючими елементами в композитах, особливо в композитах з полімерною матрицею. Скло в масі має високу твердість, помірну жорсткість, прозорість і хімічну стійкість. Крім того, скло у вигляді волокон має високу міцність і хорошу гнучкість. Багато конструкційних композитів, друкованих плат і широкого спектру спеціальних виробів виготовляються з використанням скляних волокон в якості армування.

Скло - аморфний матеріал. Спочатку склом називали аморфні сполуки, утворені зі сполук на основі кремнезему. В даний час склом називають будь-яку аморфну сполуку. Основною складовою будь-якого неорганічного

склоутворюючого матеріалу є кремнезем. Крім кремнезему, до складу скла також входять оксиди алюмінію, бору, кальцію та ін. у різних кількостях, залежно від типу скла. Скляні волокна, що використовуються в композитах, виготовляються з неорганічних сполук на основі кремнезему. Існує безліч скляних волокон з різним хімічним складом [16, 17].

Існує дві категорії скляних волокон: недорогі волокна загального призначення та високоякісні волокна спеціального призначення. Хімічний склад широко використовуваних скловолокон наведено в таблиці 2.3. Різновиди скловолокна позначені англійськими літерами, що означають особливі властивості. Волокна загального призначення становлять понад 90% використовуваних скловолокон, в основному це Е-скло. Е-скло є найбільш бажаним типом волокна для композитної промисловості через його вартість і переваги в переробці. Спочатку цей тип був розроблений для електричних застосувань через його кращі електроізоляційні властивості. Волокно загального призначення також виробляється у двох варіантах: з бором і без бору. Суворі екологічні норми в багатьох країнах змусили виробників скловолокна зменшити викиди бору, що призвело до розробки безборного Е-скло. Воно має приблизно на 5% вищий модуль пружності, ніж борвмісне скловолокно, але міцність ниток обох типів скловолокна майже однакова. Корозійна стійкість безборного скловолокна в сім разів вища, ніж у борвмісного при випробуванні в 10% сірчаній кислоті [17].

Спеціальні скляні волокна включають S-скло, C-скло, Z-скло, D-скло, M-скло, ECR-скло і кремнеземні волокна. Серед спеціальних скляних волокон ECR-волокна забезпечують кращу довготривалу кислотостійкість і короткочасну лугостійкість. С-скло забезпечує кращу корозійну стійкість до кислот порівняно з Е-склом. Воно в основному використовується в хімічній промисловості. Високоміцні скляні волокна, такі як S-скло, мають на 10%-15% вищу міцність, ніж Е-скло, але справжнє значення цих волокон полягає в їх стабільності при високих температурах. Міцність на розрив скловолокна, як правило, визначається зв'язністю силікатної мережі. Іони лугу руйнують цю

мережу. Іншою важливою складовою скловолокна є оксид бору. Хоча він може стати частиною мережі, він слабший за кремнезем. Тому високоміцні скловолокна виготовляються з меншим вмістом лугу та бору. М-скло - це високомодульне скловолокно зі значенням модуля вище, ніж у Е-скла. Однак останнім часом його виробництво припинено через токсичність BeO. Z-скло має високу стійкість до лужного середовища і в основному використовується в хімічній промисловості.

Друковані плати, як правило, виготовляються з використанням волокон Е-скла. Однак мініатюризація змушує промисловість використовувати спеціальні волокна з низькою діелектричною проникністю. Для цього були розроблені волокна зі скловолокна D. Вони містять високий вміст B_2O_3 (20-26 мас. %) і тому мають набагато нижчу діелектричну проникність, ніж у волокон Е-скло. Однак вартість цих волокон висока через необхідність використання спеціальних методів обробки для подолання проблеми високого вмісту бору [16-18].

Скловолокно виробляється методом прядіння з розплаву. Необхідна кількість природних мінералів, що відповідають кінцевому складу скла, розплавляється в печі. Цей розплав пропускають через втулку з платинового сплаву, що містить кілька сотень окремих отворів діаметром 0,793-3,175 мм. Розплавлене скло витікає безперервним потоком. З цього високов'язкого розплаву швидко витягуються волокна, які потім охолоджуються. Кінцевий діаметр волокна залежить від діаметру платинового отвору та в'язкості розплавленого скла. В'язкість, в свою чергу, контролюється хімічним складом. Діаметр скляних волокон зазвичай коливається від 3 до 20 мкм. Волокна витягуються зі швидкістю до 61 м $с^{-1}$. Окремі нитки збираються в багатоволокнисті пасма після нанесення розмірного покриття. Розмірне покриття виконує кілька функцій, таких як мастило, захисний агент, сполучна речовина і сполучна речовина з полімером, що армується. Сукупність ниток або намотується на трубку у вигляді безперервного ровінгу, або використовується для виробництва різних форм скловолокна. Схема

виробництва скловолокна та різні форми скловолокна показані на рисунках 1.8, 1.9, відповідно. Деякі спеціальні скловолокна виробляють методом мармурового розплаву. У цьому процесі сировина розплавляється, і утворюються тверді скляні кульки діаметром 20-30 мм. Ці мармурові кульки використовуються як сировина для виробництва скловолокна вищезгаданим процесом.

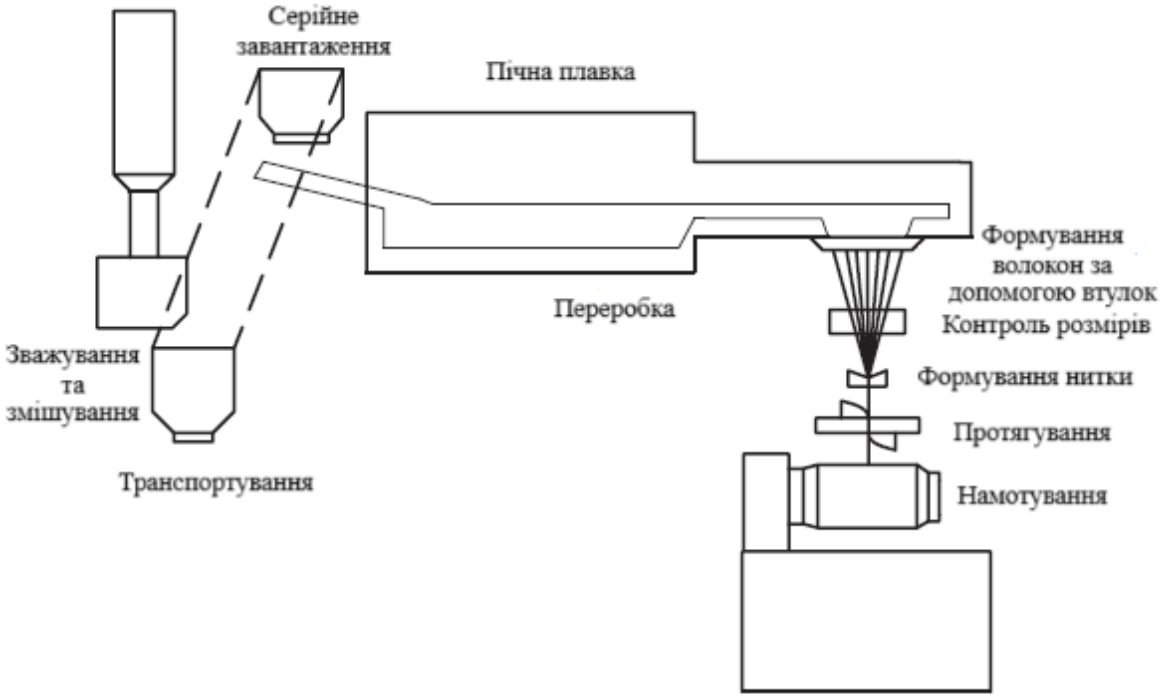
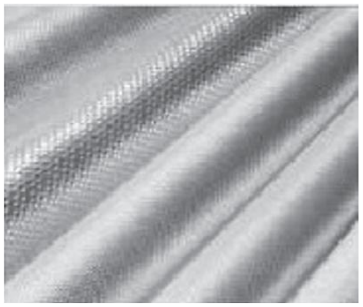


Рисунок 1.8 – Схема процесу виробництва скловолокна [19]

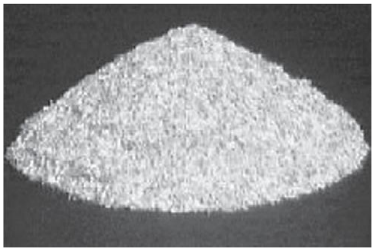
На подібних лініях виробляють висококремнеземні волокна з вмістом кремнезему понад 95% для високотемпературних застосувань до 1040°C. Вони можуть бути виготовлені шляхом кислотного вилуговування волокон Е-скло. Чисті кремнеземні волокна, що містять понад 99% кремнезему, виготовляються шляхом сухого прядіння з водно-скляних розчинів. Їх можна використовувати при температурі до 1090°C. Надчисті кремнеземні волокна з вмістом кремнезему 99,999% отримують шляхом сухого прядіння з високочистого тетраетил-ортосилікатного гелю.

Стрічки

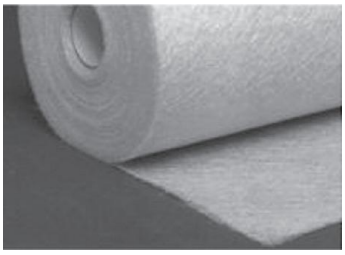


Ткані стрічки

Безперервне волокнисте полотно



Подрібнені смужки



Полотно з подрібнених смужок

Склоровінг

Рисунок 1.9 – Різні форми скловолокна [19, 20]

Важливі форми скловолокна

Після виробництва безперервних скляних волокон їх необхідно перетворити у форму, придатну для використання в композитах. Важливими формами волокон зі скловолокна є безперервний ровінг, тканий ровінг, рубані пасма (CSM), рубані пасма, безперервні пасма, пряжа і тканини. Під час процесу прядіння з розплаву волокна збираються у вигляді ниток, що складаються приблизно з 200 окремих філаментів. Ровинг - це сукупність безперервних ниток. Ровінги скловолокна зазвичай позначаються як «текс». Текс - це число, яке вказує на вагу ровінгів у грамах на кілометр довжини. Скловолокниста дріт доступна зі значеннями текс 150, 300, 600, 1200, 2400 і 4000. Ровінги безпосередньо використовуються в багатьох процесах, таких як намотування ниток і пултрузія. У цих процесах ровинг пропускається через ванну з рідкою смолою, а потім намотується на оправку або протягується через нагріту фільєру. У процесі розпилення ровинг подрібнюється, і пневматичний

пістолет подає подрібнені пасма зі смолою у форму. При виробництві листової формувальної суміші (SMC) ровер нарізається на шар смоляної пасти і пресується в лист.

Тканий ровинг виробляється шляхом переплетення ровингів у тканину (мат). Ткані ровничні мати доступні з різною поверхневою щільністю, наприклад, 200, 360, 600 і 800 г м-2 (GSM). Ця форма широко використовується в процесі ручного укладання для підвищення міцності виробу, а також у процесі формування панелей. Існує багато конфігурацій переплетення, які відповідають вимогам ламінованих композитів. Полотняне або саржеве переплетення забезпечує міцність у двох перпендикулярних напрямках, тоді як односпрямовано прошита або трикотажна тканина забезпечує міцність переважно в одному напрямку.

Скловолокнисті мати можуть вироблятися з використанням нарізаних пасом, а також безперервних пасом. CCM виробляється шляхом випадкового розміщення на конвеєрній стрічці нарізаних пасом довжиною 5-50 мм і розпилення поверх них хімічної сполучної речовини. Зв'язуючою речовиною зазвичай є термопластичний матеріал. Відповідний зв'язуючий можна вибрати залежно від необхідного рівня розчинності в стиролі. Для деяких застосувань, таких як помірна корозійна стійкість вкладишів або корпусів човнів, виготовлених вручну, потрібна висока розчинність у стиролі, тоді як низька розчинність у стиролі потрібна, коли композит виготовляється холодним пресуванням або компресійним формуванням, щоб запобігти вимиванню у формі під час затвердіння. CSM доступні з різною поверхневою щільністю, наприклад, 300, 450, 600 і 900 г м-2 (GSM).

Мати з безперервною ниткою виробляються аналогічним чином, але з безперервною ниткою. Зазвичай в такому маті використовується менше сполучного, оскільки безперервні волокна можуть дещо сплутуватися. Мати з безперервних ниток використовуються в закритих прес-формах для запобігання вимивання волокон смолою, що витікає. Вони також використовуються в процесі пултрузії для поліпшення поперечної міцності.

Рубані пасма - це короткі волокна довжиною від 3,2 до 12,7 мм, які вирізаються з висушеної безперервної рівниці або подрібнюються у вологому стані під час виробництва волокна. Вони широко використовуються в процесі лиття під тиском. Волокно і полімер змішуються в сухому вигляді і екструдуються, утворюючи композитні гранули. Ці гранули використовуються для виготовлення термопластичних композитів методом лиття під тиском. Подрібнені пасма також використовуються для приготування об'ємних формувальних сумішей з термореактивною полімерною смолою. Ця формувальна суміш використовується для виготовлення композитів методом компресійного формування.

Фрезеровані волокна отримують шляхом молоткового фрезерування подрібнених або розрізаних безперервних пасом. Типові розміри фрезерованих волокон коливаються від 0,79 до 6,4 мм. Вони не можуть забезпечити підвищену міцність через відносно низьке співвідношення сторін, але забезпечують деяку підвищену жорсткість і стабільність розмірів пластмас. Фрезеровані волокна в основному використовуються у фенольних смолах, реакційних литих уретанах і фторвуглецях.

Нитки - це скручені волокна, які мають кращу цілісність в процесі ткацтва. Скловолокнисті тканини виготовляються шляхом традиційного переплетення ниток. Основні характеристики тканин залежать від схеми переплетення та кількості ниток. В основному існує чотири типи переплетення: полотняне, комірчасте, саржеве та сатинове. Більш детальну інформацію про схему переплетення можна знайти в будь-якій книзі з текстилю. У контексті виготовлення композитів гнучкість тканини є важливим параметром для кращої відповідності складним контурам. Найкращу відповідність дає атласне переплетення, далі йде саржа, кошик і найменше - полотняне переплетення. Щільність тканого полотна з пряжі позначається товщиною полотна в міліметрах. Наприклад, 70-міліметрове полотно має товщину 0,07 дюйма (1,78 мм) [12, 14, 16] .

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Характеристика використаних матеріалів

2.1.1 Епоксидна смола LH 289

Епоксидна смола LH 289 є інноваційним матеріалом, що вирізняється винятково низькою в'язкістю. Цей матеріал знайшов широке застосування у виробництві композитних матеріалів та як фінішне покриття для штучного каменю. Однією з ключових переваг цієї смоли є її стабільність при зберіганні за звичайних температур, де вона не проявляє схильності до кристалізації. Особливо варто відзначити, що суміш смоли із затверджувачем характеризується високою оптичною прозорістю.

На відміну від багатьох інших епоксидних смол, LH 289 зберігає свою прозорість та не утворює помутніння навіть при низьких температурах від 0 до 10°C. При змішуванні з затверджувачем утворюється композиція з низькою в'язкістю, що забезпечує відмінні властивості змочування поверхонь. Завдяки цій характеристиці повітряні бульбашки легко видаляються з поверхні ламінату, забезпечуючи високу якість кінцевого продукту.

Технологічний час обробки матеріалу можна регулювати в широких межах - від 15 хвилин до 5 годин, залежно від обраного типу затверджувача. Матеріал демонструє високу термічну стабільність, зберігаючи свої властивості в діапазоні температур від 50 до 100°C. Процес обробки можна здійснювати при температурах від 10 до 50°C, що забезпечує гнучкість технологічного процесу.

Затвердіння матеріалу можна проводити різними способами. При кімнатній температурі (10-30°C) можливе застосування різноманітних комбінацій процесів ламінування та затвердіння. Якщо затвердіння відбувається при температурі близько 30°C, матеріал набуває термостійкості в межах 40-60°C. Для досягнення підвищеної термостійкості (до 90°C)

рекомендується застосовувати поступове термічне затвердіння при температурах 50-70°С.

Така універсальність у застосуванні та обробці робить епоксидну смолу LH 289 (табл. 2.1) оптимальним вибором для широкого спектру промислових застосувань, де потрібні висока прозорість, низька в'язкість та хороша термостійкість матеріалу.

Таблиця 2.1 – Фізікомеханіческіх властивості смоли LH 289

Показник	Епоксидна смола LH 289
1	2
Зовнішній вигляд	Медоподібна жовтувата рідина, легко забарвлюється
Густина при 20 °С, кг / м³	1,16-1,25
Міцність при розтягуванні, МПа	40-90
Міцність при згині, МПа	80-140
Міцність при стисканні, МПа	100-200
Температура полімеризації, ° С	від 20
Середнє рекомендоване співвідношення затверджувач-смола	7:1
Час полімеризації	1,5 години
Час повної полімеризації	24 години
Водопоглинання за 24 год,%	0,01-0,1
Ударна в'язкість, кДж / м²	5-25
Теплостійкість, ° С	55-170
В'язкість при 20 ° С, МПа,° С	4000
Ударна в'язкість, кДж / м² 19	19
Гарантійний термін зберігання епоксидної смоли, затверджувача, роки	1,5-2

Кінець таблиці 2.1

Призначення	Епоксидна смола LH 289 призначена для: виготовлення та ремонту деталей корпусів човнів, яхт, літаків, автомобілів і т. д. в меблевій, електротехнічної та радіотехнічної промисловості; як компонент заливальних і просочувальних компаундів, клеїв, герметиків, зв'язуючих для армованих склопластиків.
Умови зберігання епоксидної смоли LH 289	Слід зберігати в щільно закритій тарі при температурі навколишнього середовища від 15 до 40 °С.

Епоксидна смола LH 289 демонструє надзвичайну універсальність у практичному застосуванні. Її використовують для захисту та обробки каменю, створення міцних кам'яних доріжок, виготовлення композитних деталей для човнів та різноманітного спортивного обладнання. Для досягнення оптимальних результатів рекомендується використовувати затверджувач H 536 у пропорції 35 частин за вагою, що забезпечує зручний час роботи з матеріалом від 50 до 70 хвилин.

Важливо відзначити, що матеріал зберігає свої властивості навіть після закінчення гарантійного терміну, якщо відсутні ознаки желатинізації та загущення. Однак при роботі з матеріалом слід дотримуватися певних застережень. Зокрема, змішування великих об'ємів смоли із затверджувачем вимагає використання спеціального змішувального обладнання для запобігання небажаному перегріву суміші. На відміну від цього, при роботі з акриловою смолою технакріл достатньо просто дотримуватися рекомендованих пропорцій змішування без застосування спеціальної апаратури.

Епоксидно-діанові смоли, включаючи LH 289, знайшли широке застосування в різних галузях промисловості. В електротехнічній та радіоелектронній промисловості, авіа-, судно- та машинобудуванні ці

матеріали стали незамінними. У будівельній галузі їх використовують як компоненти заливальних та просочувальних компаундів, для виготовлення клеїв, герметиків, як зв'язуючі для армованих пластиків, у складі лакофарбових матеріалів, для виробництва склопластику та створення наливних підлог.

Особливо важливу роль ці смоли відіграють у виробництві епоксидних клеїв та просочувальних матеріалів для склотканини. Вони активно застосовуються при виготовленні та ремонті різноманітних корпусних конструкцій, включаючи вуглепластикові, склопластикові та карбонові елементи. У будівництві їх використовують для гідроізоляції приміщень, особливо підвальних просторів та басейнів. Крім того, ці смоли служать основою для виробництва емалей, лаків, шпаклівок та як базовий матеріал для створення інших епоксидних смол та модифікуючих добавок.

Унікальність епоксидно-діанових смол LH 289 полягає в тому, що кінцеві властивості виробів можна регулювати шляхом підбору різних затверджувачів, добавок та пластифікаторів. Це забезпечує високу технологічність при переробці та можливість створення матеріалів з широким спектром характеристик, що відповідають конкретним вимогам різних галузей застосування [12].

2.1.2 Склоровінг для армування

Склоровінг - це комплексна неперервна нитка, що складається з великої кількості елементарних скляних волокон, зібраних в єдиний пучок без крутки. Він класифікується за різними параметрами, включаючи тип скла, лінійну густину та тип замаслювача.

За типом скла розрізняють Е-скло, яке є найбільш поширеним і використовується для електроізоляції, S-скло, що відрізняється підвищеною

міцністю, С-скло з високою хімічною стійкістю, та ECR-скло, яке має відмінну корозійну стійкість.

За лінійною густиною (текс) склоровінг поділяється на легкий (300-1200 текс), середній (1200-2400 текс) та важкий (2400-4800 текс). Тип замаслювача може бути силановим, хромовим або комбінованим.

Основними характеристиками склоровінгу є міцність на розрив, модуль пружності, діаметр елементарного волокна, вологість, масова частка замаслювача та густина розподілу волокон. Ці параметри визначають його експлуатаційні властивості та сфери застосування.

Склоровінг широко використовується у виробництві композитів різними методами, такими як пултрузія, намотування, ручне формування та RTM-процес. У будівництві він застосовується для армування бетону, виготовлення композитної арматури та виробництва сендвіч-панелей.

В транспортній галузі склоровінг знаходить застосування в автомобілебудуванні, суднобудуванні та авіабудуванні. У промисловості його використовують для виготовлення ємностей, труб та різноманітних профілів.

Серед головних переваг склоровінгу - висока міцність при відносно низькій вазі, відмінна хімічна стійкість, хороші діелектричні властивості, висока термостійкість, довговічність та економічна ефективність. Ці характеристики роблять його незамінним матеріалом у багатьох галузях промисловості. У роботі було використано склоровінг R25 H Tex 2400, властивості якого зазначено нижче.

Характеристики склоровінгу R25 H Tex 2400 [21]:

- Лінійна густина: 2400 текс
- Діаметр елементарного волокна: близько 13-17 мкм
- Вологість: не більше 0,2%
- Замаслювач: силановий, адаптований для епоксидних та поліефірних смол
- Розривне навантаження: не менше 50 Н
- Високі показники адгезії до полімерних матриць

- Відмінна просочуваність
- Легке розпускання при переробці
- Стійкість до корозії та хімічних впливів
- Температурний діапазон експлуатації: від -60°C до +250°C
- Рівномірність розподілу волокон у структурі
- Низький рівень ворсистості

Даний тип склоровінгу найчастіше використовується для виробництва композитних матеріалів методом пултрузії, намотування та ручного формування.

2.2 Методи визначення механічних властивостей та визначення кількості наповнювача ПКМ

Вивчення механічних властивостей композитів на основі полімерів є критично важливим для розуміння та оцінки ефективності цих матеріалів при їх використанні в різних галузях. Для отримання повної характеристики властивостей таких матеріалів необхідно застосовувати комплексний підхід з використанням різноманітних методів вимірювання. Такі дослідження дозволяють визначити ключові параметри матеріалів, включаючи їх міцність при різних видах навантаження, структурну стабільність, здатність протистояти ударним навантаженням та інші важливі механічні характеристики. Систематизація та аналіз отриманих даних дає можливість створити повну картину властивостей досліджуваних композитів та оцінити їх придатність для конкретних застосувань.

Метод визначення ударної в'язкості за методом Шарпі регламентується ГОСТ 4647-2015 і застосовується для дослідження механічних властивостей пластмас. Метод передбачає випробування зразків як з надрізами, так і без них, шляхом прикладання ударного навантаження за допомогою маятникового

копра. Під час випробування зразок розміщується на двох опорах, причому для зразків з надрізом удар наноситься точно посередині між опорами напроти надрізу. Цей метод дозволяє оцінити поведінку матеріалу при ударному навантаженні та визначити його схильність до крихкого або в'язкого руйнування в межах встановлених умов випробування. Згідно зі стандартом, для проведення випробувань використовуються спеціальні зразки типу Менаж, які повинні мати чітко визначені геометричні параметри та форму, показані на рис 2.1.

Таблиця 2.2 – Методи визначення механічних властивостей ПКМ [4, 5]

Назва методу	Опис	Процедура	Результат
Розтягування	Метод визначення міцності матеріалу при розтягуванні.	Зразок матеріалу розтягується до того часу, поки він не поламається.	Дає інформацію про міцність, модуль пружності, і деформації при розтягуванні.
Згинання	Визначення міцності матеріалу при згині.	Зразок підданий згинанню, і вимірюються зусилля та відгини.	Дає інформацію про модуль пружності в згині.
Ударний тест	Визначення стійкості матеріалу до ударних навантажень	Зразок підданий удару, і вимірюється здатність матеріалу поглиблювати ударну енергію.	Вказує на стійкість матеріалу до ударних навантажень.
Жорсткість та пружність	Визначення жорсткості та пружності матеріалу.	Засіб, такий як твердість по Віккерсу чи Брінелю, може використовуватися для визначення жорсткості.	Вказує на жорсткість та пружність матеріалу

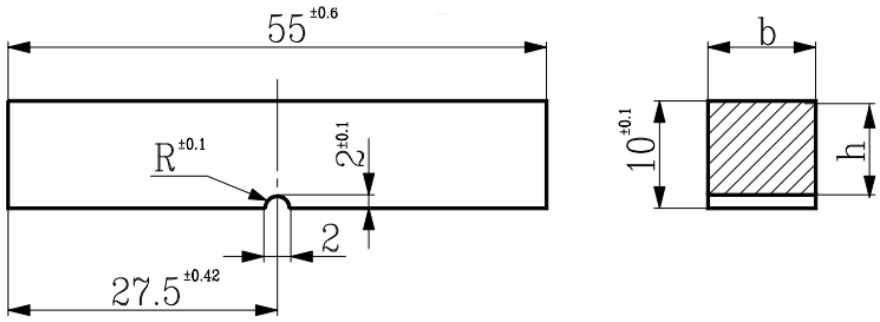


Рисунок 2.1 – Зразок типу Менаже і його розміри [8]

Копер - спеціалізований прилад для визначення ударної міцності матеріалів, схема якого представлена на рис 2.2. Цей інструмент використовує маятниковий механізм для проведення випробувань на ударний згин. Маятниковий копер застосовується для визначення енергії руйнування зразків при випробуваннях на двоопорний згин за методом Шарпі. Прилад відповідає вимогам міжнародних та національних стандартів, включаючи ISO148-2-1998, ASTM-E23-98, GB/T3808-22-002 та ГОСТ 4647-2015. Зокрема, модель маятникового копра JB-500B розроблена спеціально для дослідження високоміцних матеріалів та чорних металів, дозволяючи визначати їх максимальний опір при ударному навантаженні.

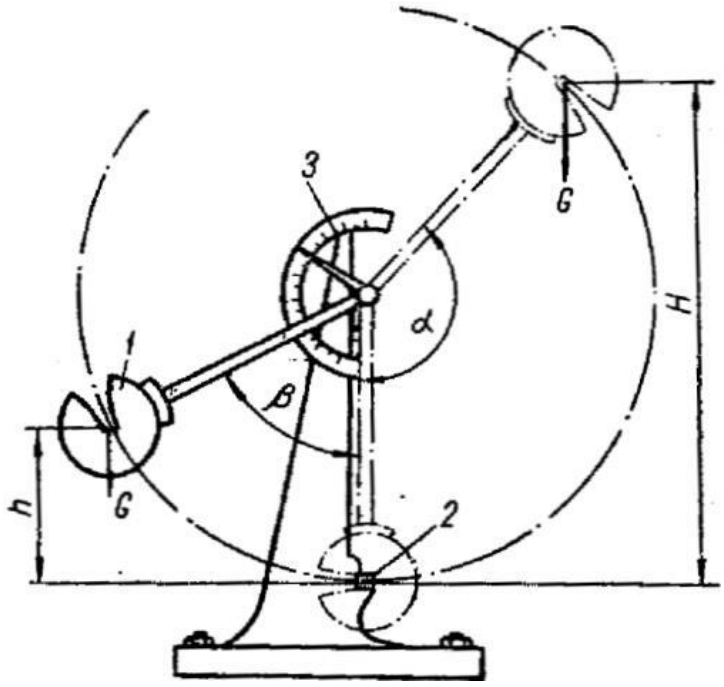


Рисунок 2.2 – Маятниковий копер [8]

Принцип роботи копра базується на використанні потенціальної енергії піднятого маятника на певну висоту. Під час випробування, маятник, що падає, передає частину своєї енергії зразку при ударі, після чого піднімається на меншу висоту. Робота, витрачена на руйнування зразка ($А_к$), може бути визначена за допомогою спеціальних таблиць, які враховують кут підйому маятника після удару (β). Для розрахунку середнього напруження удару матеріалу зразка використовується формула:

$$KC = \frac{A_k}{F_0} \qquad (Дж / м^2)$$

де F_0 – загальна площа зразка в зоні розрізу.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Визначення типу намотування

Одним з найпоширеніших і найдосконаліших процесів виготовлення високоміцних армованих виробів, форма яких визначається обертанням довільних твірних, є процес безперервного намотування.

При цьому способі нитка, стрічка, джгут або тканина укладаються за заданою траєкторією на оправку, що обертається, яка несе внутрішню геометрію виробу.

Способи намотування класифікуються за такими ознаками:

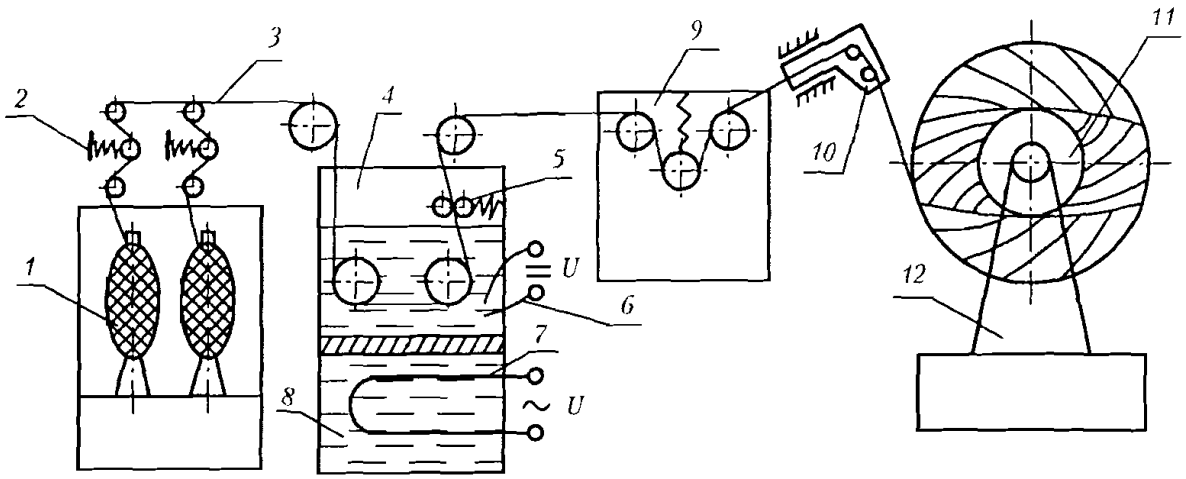
• спосіб поєднання зв'язуючого і наповнювача;

• рисунок укладання арматури;

• кінематика намотувального обладнання.

Намотування з препрегів, або "сухе" намотування, забезпечує рівномірний вміст зв'язуючого, що задається при виготовленні препрегів, і, внаслідок цього, стабільність міцнісних властивостей по виробу; при використанні "сухого" методу підвищується культура виробництва і збільшується продуктивність; проте при цьому методі необхідно забезпечувати значний натяг арматури.

Спосіб "мокрого" намотування відрізняється тим, що просочення армуючого волокнистого матеріалу зв'язуючим і намотування на оправку поєднані (рис. 3.1). Спосіб реалізується при нижчому зусиллі натягу арматури, що дозволяє застосовувати обладнання з меншою потужністю приводу і оправки меншої жорсткості [22]. "Мокре" намотування забезпечує краще формування виробів при високій герметичності, тому переважно застосовується для виготовлення великогабаритних оболонок складної конфігурації та посудин високого тиску.



1 – шпулярник; 2 – індивідуальні натяжителі ниток; 3 – арматура; 4 – просочувальна ванна зі зв'язуючим; 5 – віджимні ролики; 6 – система підігріву та контролю температури зв'язуючого; 7 – ТЕН; 8 – масло; 9 – натяжитель сформованої стрічки; 10 – розкладник; 11 – оправка, що обертається; 12 – намотувальний верстат

Рисунок 3.1 – Схема "мокрого" намотування

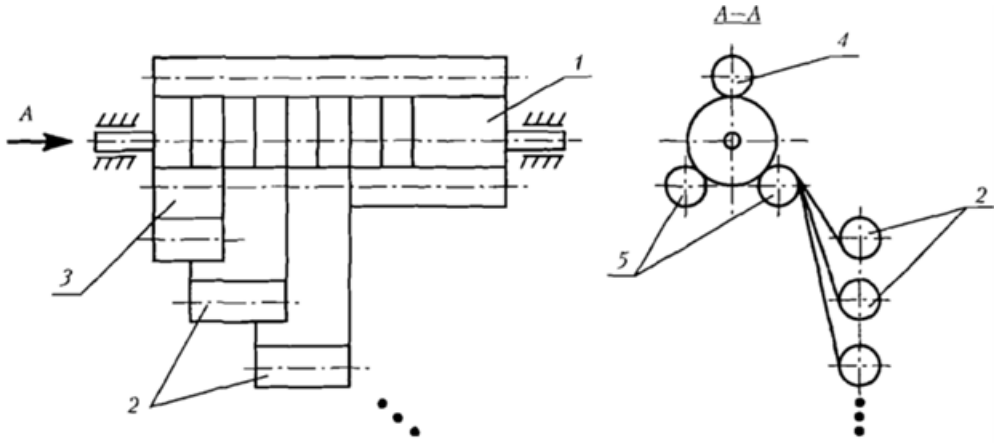
За рисунком укладання арматури способи намотування поділяють на такі різновиди [2, 3, 5].

Поперечне (кільцеве) намотування. При цьому способі препрег у вигляді стрічок укладається в площині, перпендикулярній осі обертання оправки (рис. 3.2).

Поздовжнє (осьове) намотування. Арматура укладається вздовж осі виробу (рис. 3.3), при цьому розкладник 2 рухається по напрямній 3 від полюса до полюса і при зміні напрямку руху оправки 1 провертається на кут 180°+А, де А — крок намотування.

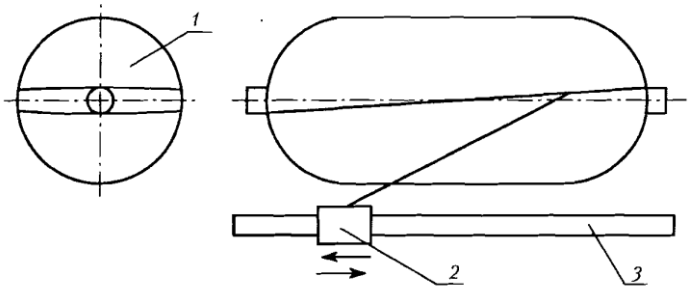
Поздовжньо-поперечне намотування є комбінацією поперечного та осьового (рис. 3.4). Вертлюг 2, на якому по периметру встановлені шпулі 3 зі стрічковою арматурою, обертаючись синхронно з оправкою 1, переміщується при цьому вздовж осі оправки, укладаючи поздовжні стрічки 4. Одночасно поперечні розкладники 5, переміщуючись вздовж осі оправки, укладають

стрічкову арматуру 6, що фіксує стрічки поздовжнього укладання. Метод, як правило, застосовується при "сухому" режимі виготовлення виробу.



1 – оправка; 2 – рулони з препрегом; 3 – стрічки препрегу; 4 – прикатний ролик, що підігрівається; 5 – приводні ролики

Рисунок 3.2 – Схема поперечного намотування

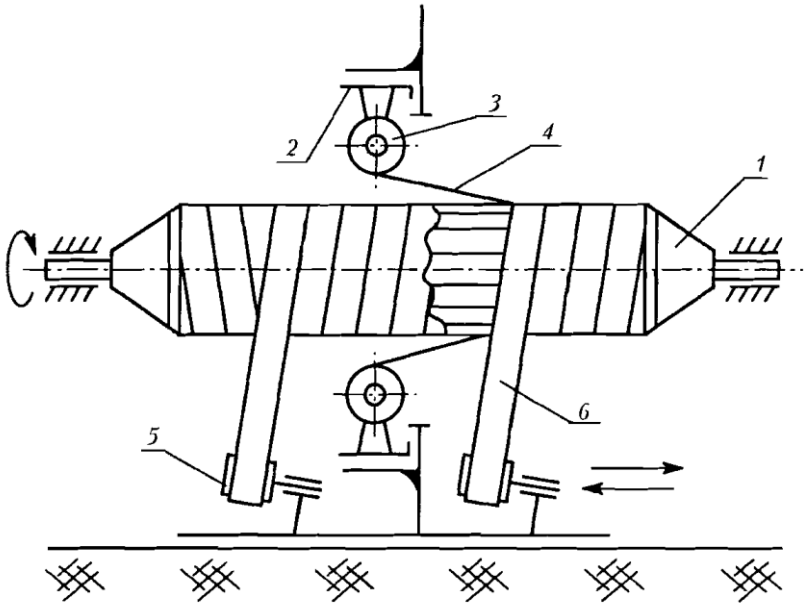


1 – оправка; 2 – розкладник; 3 – напрямна

Рисунок 3.3 – Схема осьового намотування

Спіральне намотування полягає в тому, що сформована стрічка волокнистого матеріалу, просочена полімерним зв'язуючим, укладається на поверхню оправки, що обертається, по гвинтовій лінії (рис. 3.5, а). Швидкості переміщення розкладника і обертання оправки 1 задаються такими, щоб забезпечити потрібний кут намотування (β). Витки, утворені безперервним укладанням стрічки, щільно укладені один до одного або мають постійний

напуск, величина якого визначається кількістю шарів, що одночасно формуються. Кут намотування визначається як кут між дотичними, проведеними до твірної оболонки, що намотується, і до лінії укладання арматури через точку їх перетину.



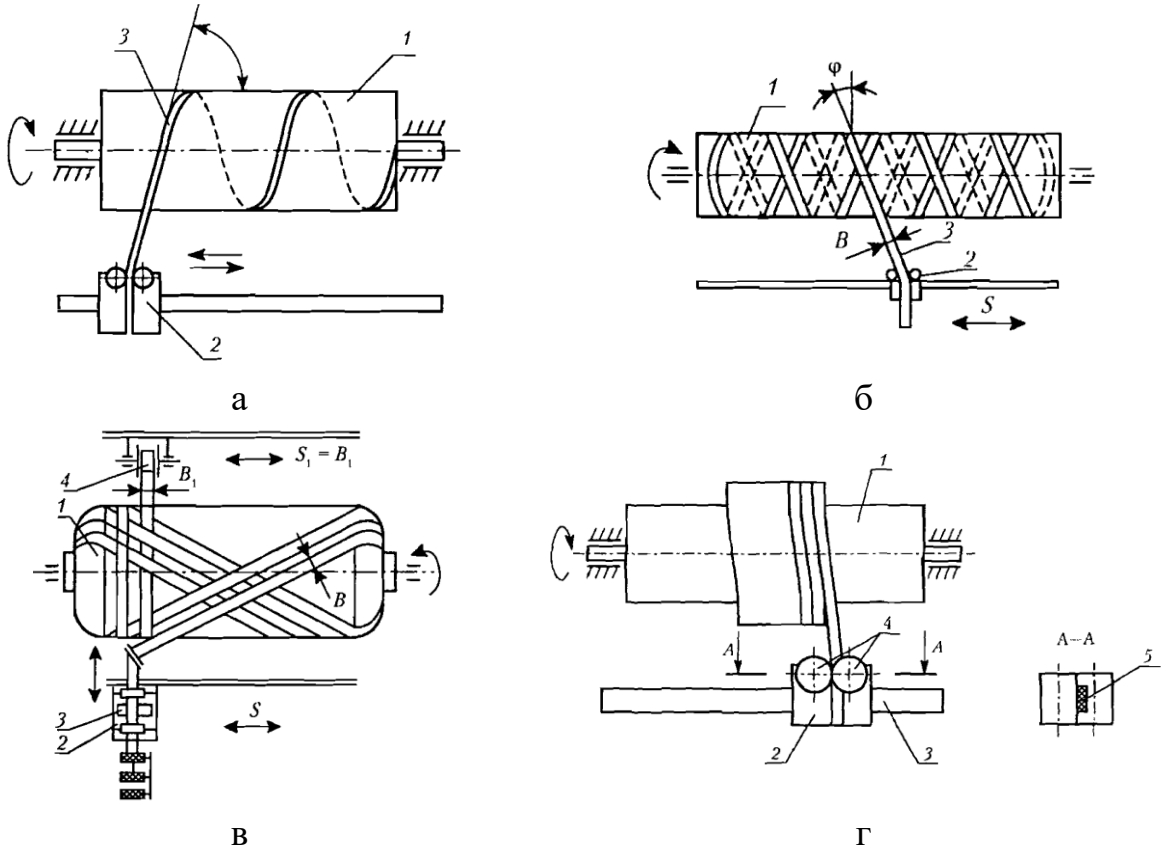
1 – оправка; 2 – вертлюг; 3 – шпулі; 4 – стрічки поздовжнього укладання; 5 – поперечні розкладники; 6 – стрічки поперечного намотування

Рисунок 3.4 – Схема поздовжньо-поперечного намотування

Також застосовуються схеми спірально-перехресного (рис. 3.5, б) та суміщеного спірально-кільцевого намотування (рис. 3.5, в) [22].

Головним різновидом спірального намотування є геодезичне намотування, при якому армуючий матеріал лягає на поверхню оправки по геодезичних лініях. З усіх можливих ліній, що лежать на поверхні оправки, геодезична – та, яка найкоротшим шляхом з'єднує дві довільні точки, що належать цій поверхні. На площині – це пряма, на циліндрі – гвинтова лінія, на сфері – коло великого діаметра.

Інший різновид спірального намотування – це покрівельне (рис. 3.6), при якому витки армуючої стрічки 5 укладаються на оправку 1 щільно один до одного без перекриття.



а – проста; б – спірально-перехресна; в – спірально-кільцева; г – покрівельного намотування; 1 – оправка; 2 – розкладник; 3 – стрічка препрегу; 4 – розкладник для кільцевого укладання (для г: 3 – напрямна 4 – орієнтуючі ролики 5 – стрічка)

Рисунок 3.5 – Схеми спірального намотування

3.2 Формування виробів з армованих пластиків

Формування — це етап технологічного процесу, при якому відбувається тверднення зв'язуючого. В цей період створюється кінцева структура

матеріалу, формуються його властивості та фіксується форма виробу. Твердnення зв'язуючого є результатом росту молекул та утворення полімерної сітки під впливом каталізатора (затверджувача) і відповідних зовнішніх умов. При цьому виділяють дві характерні стадії тверднення:

• початкову – до формування полімерної сітки;

• кінцеву – в процесі формування полімерної сітки; ці дві стадії відділені одна від одної так званою фазою гелеутворення.

Фаза гелеутворення відповідає такому моменту, коли зв'язуюче втрачає здатність переходити в текучий стан і розчинятися, тобто втрачає свою життєздатність і технологічні якості. Це одна з найбільш важливих технологічних характеристик процесу тверднення.

На певному етапі тверднення в'язкість зв'язуючого збільшується до рівня, що відповідає в'язкості твердого тіла.

Всі властивості його різко змінюються:

• зменшується питомий об'єм;

• збільшується твердість;

• зростає опір деформації; рідке зв'язуюче переходить у склоподібний стан; температура, при якій відбувається це явище, називається температурою склування; склування не є фазовим переходом, оскільки матриця зберігає аморфну структуру і з термодинамічної точки зору може розглядатися як переохолоджена рідина.

Характерним параметром зв'язуючого є також точка деструкції, при якій починається помітний розклад матриці, що супроводжується розривом молекулярних зв'язків. Стійкість до деструкції характеризується термостійкістю, яку слід відрізняти від теплостійкості, що відображає здатність полімеру до розм'якшення.

Параметри формування. Щоб забезпечити потрібні якості композиту, необхідно створити певні умови для тверднення зв'язуючого. Температурний режим забезпечує необхідні умови для його полімеризації. Підвищений тиск повинен виконати наступні функції: ущільнити шари матеріалу, завершити

просочення волокна смолою, витиснути з порожнин леткі побічні продукти реакції, захоплене повітря, а також надлишок смоли з шарів матеріалу.

До основних технологічних параметрів відносяться: тиск, температура, швидкість їх зміни за часом і ступінь твердіння.

Конкретній комбінації зв'язуючого та арматури будуть відповідати свої параметри. В процесі виробництва їх величину необхідно строго витримувати.

Класифікація схем формування. На даний час існує багато різних способів формування виробів з ПКМ. Це пояснюється різноманітністю властивостей вихідних компонентів композитів, заготовок, напівфабрикатів, а також різними вимогами до міцності та інших параметрів виробів.

Класифікація схем формування, в залежності від способу забезпечення тиску на препрег, наведена на рис. 9.72.

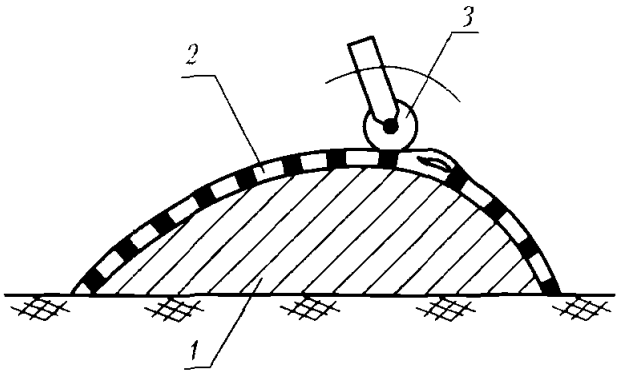
Розглянемо послідовно кожну групу методів формування.

Рисунок 3.6 – Класифікація схем формування

3.2.1 Контактне формування

Контактне формування характеризується тим, що тиск на поверхню препрегу здійснюється механічним впливом. Існує два основних види такого формування.

Перший вид - це *формування роликами* (рис. 3.7). Цей метод використовується переважно при викладці препрегів на поліефірних або епоксидних зв'язуючих холодного тверднення. Суть методу полягає в тому, що кожен шар препрегу, який укладається у форму, прикочується роликом. Це забезпечує ущільнення шарів препрегу, видалення бульбашок повітря та надлишкового зв'язуючого. Матеріал, отриманий таким способом, містить близько 60-70% зв'язуючого. Міцність виробів при цьому невелика, тому метод використовується для виготовлення неважливих деталей.



1 – оправка; 2 – препрег; 3 – ролик

Рисунок 3.7 – Прикатка роликом

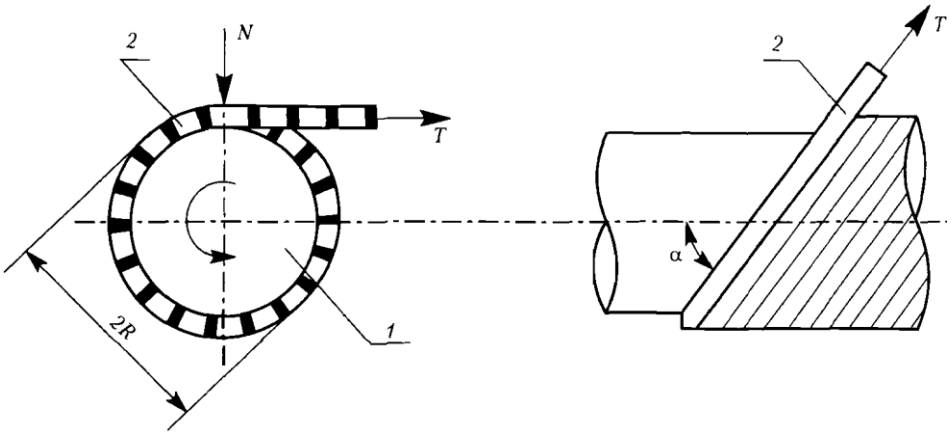
Другий вид - *формування натягом нитки* (стрічки, джгута) (рис. 3.8). Цей метод застосовується при намотуванні, коли тиск для ущільнення шарів матеріалу створюється технологічним натягом арматури. При намотуванні на циліндричну оправку величина контактного тиску визначається за формулою

$$N = (T/R)\sin^2\alpha,$$

де T - це зусилля натягу стрічки,

R - радіус оправки,

α - кут укладання стрічки.



1 – оправка; 2 – препрег

Рисунок 3.8 – Контактний тиск при намотці

Важливо зазначити, що при збільшенні товщини намотки за постійного натягу T контактний тиск зменшується. Тому для підтримки постійного контактного тиску протягом всього намотування необхідно програмувати зусилля натягу.

Технологічний натяг арматури створюється спеціальними натяжними пристроями трьох типів: гребінчастими, у вигляді вісімки, або гальмівними пристроями на шпулях. У гребінчастих пристроях та пристроях у вигляді вісімки натяг створюється тертям арматури об поверхні гребінки або роликів. Регулювання натягу здійснюється зближенням гребінок або зміною кута охоплення роликів шляхом повороту "вісімки".

Контактне формування натягом нитки має дві основні проблеми:

1. При намотуванні на оправку з різними радіусами кривизни:

- У зонах більшої кривизни - вища щільність укладки

- У зонах малої кривизни - низький тиск і можливе розшарування
- Типовий приклад - лонжерони лопатей вертольота

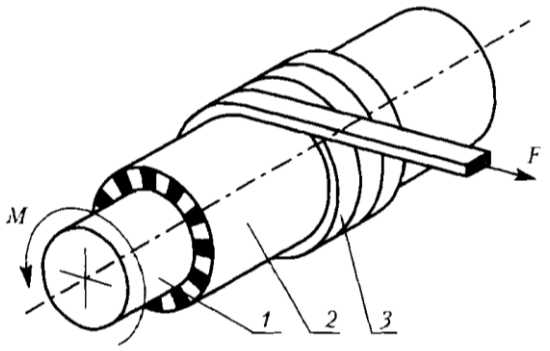
2. При намотуванні товстих виробів:

- Тиск шарів сумується до центру
- В центрі - нестача зв'язуючого
- На периферії - надлишок зв'язуючого
- Результат - нерівномірна міцність

Метод ефективний лише для циліндричних деталей. Для деталей зі змінним радіусом потрібні додаткові методи ущільнення.

Формування обмоткою гумовим джгутом передбачає створення тиску на препрег, розміщений на жорсткій оправці, шляхом намотування розтягнутого еластичного гумового джгута в кілька шарів. При цьому з кожним новим шаром намотки обтискне зусилля на препрег зростає.

Метод має суттєві переваги: забезпечує високий тиск на поверхню препрегу, простий в оснащенні, не потребує спеціального обладнання та дозволяє формувати довгі вироби без обмеження розмірів. Проте існують і недоліки: обмеження при формуванні виробів складної форми та низька якість зовнішньої поверхні. Для покращення якості поверхні можна встановлювати цулагу під джгут, а в деяких випадках замінювати гумовий джгут на сталевий трос.



1 – оправка; 2 – препрег; 3 – гумовий джгут

Рисунок 3.9 – Формування гумовим джгутом [10]

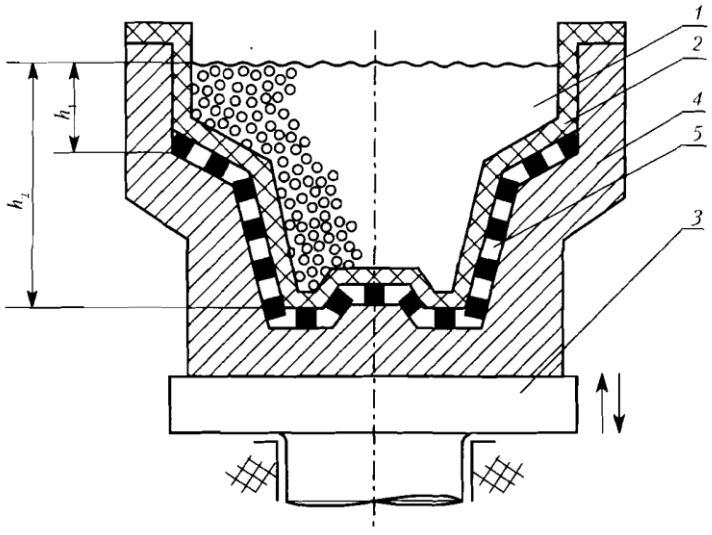
Вібраційне формування (рис. 3.10) – це метод створення тиску на препрег за допомогою пуансона, що складається з сипкого матеріалу (дріб, пісок) в еластичній гумовій оболонці. Тиск створюється інерційними силами при вібрації форми.

Процес має дві стадії:

1. Формування - забезпечення щільного прилягання поверхонь. Змінний тиск через різну висоту сипкого матеріалу зменшує тертя між шарами та полегшує видалення летючих продуктів.
2. Ущільнення структури - досягається вібраційним ударом, коли матеріал періодично відривається і падає на поверхню форми.

Режими вібраційного формування встановлюються з урахуванням резонансних умов, що дозволяє досягти максимального ущільнення при мінімальних енерговитратах.

Незважаючи на переваги, метод рідко використовується в промисловості через обмеження розмірів деталей та шкідливий вплив вібрації на працівників.



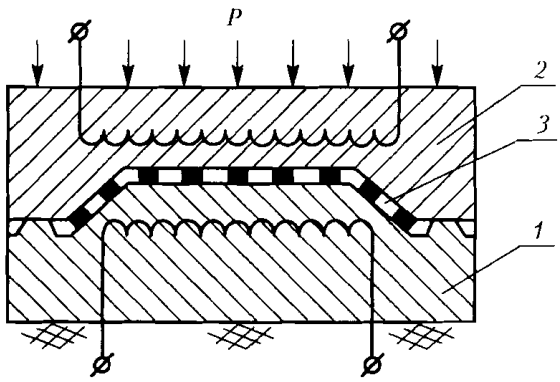
1 – дріб; 2 – гумова оболонка; 3 – стіл вібромашини; 4 – форма; 5 – препрег

Рисунок 3.10 – Схема вібраційного формування [10]

3.2.2 Пресове формування

Характеризується застосуванням пресового обладнання, що передає тиск на препрег через оснащення штампового типу.

Жорстке пресування. Пресове формування використовує прес-форми для створення тиску на препрег. При жорсткому пресуванні застосовуються дві прес-форми - позитивна і негативна, розташовані на відстані, що відповідає товщині майбутньої деталі (рис. 3.11).



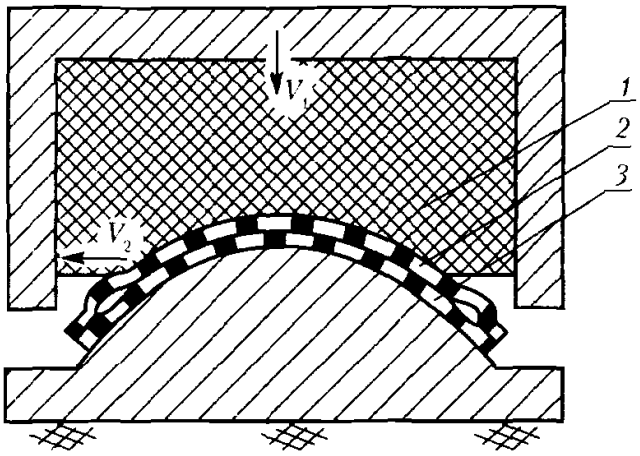
1 і 2 - нижня і верхня частини прес-форми; 3 - препрег

Рисунок 3.11 – Формування жорстким пресуванням

Техпроцес включає змащування форм антиадгезійним покриттям, нагрів до 50-70°С, викладку препрегу та створення тиску. Тиск прикладається поетапно: спочатку попереднє ущільнення (0,5-0,7 МПа), потім повне формування (1,5-2,0 МПа), затвердіння і охолодження (0,7-0,9 МПа).

Метод забезпечує високу точність розмірів і якість поверхні, але має обмеження: нерівномірність тиску на різних ділянках, обмеження по формі деталей, неповне використання властивостей армування та висока вартість оснастки. Найкраще підходить для виготовлення деталей з пологим рельєфом без різких перепадів товщини.

Пружне пресування (рис. 3.12) відрізняється від жорсткого використанням еластичного (гумового) пуансона замість жорсткого. При стисненні гумового пуансона створюється хвилеподібний тиск, що сприяє ущільненню композиції та видаленню повітря між шарами препрегу.



1 - гумовий пуансон; 2, 3 - шари препрега

Рисунок 3.12 – Характер навантаження під час пружного формування [10]

Переваги методу:

- Можливість формування деталей складної форми та великих розмірів
- Рівномірний розподіл тиску по всій поверхні
- Незалежне регулювання тиску на різних ділянках
- Висока якість кінцевих виробів

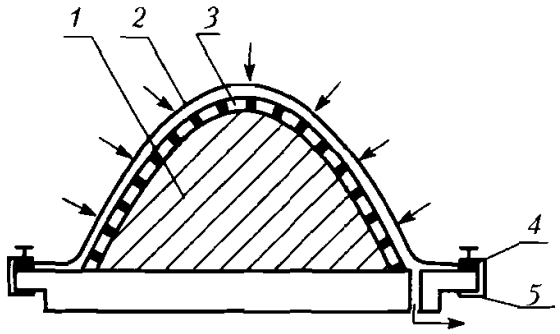
Недоліки:

- Висока вартість обладнання
- Складність обслуговування та налаштування поршневої системи
- Обмеження по товщині та розмірам деталей

Метод найбільш ефективний для виробництва великогабаритних деталей складної конфігурації, де потрібен контрольований розподіл тиску по поверхні.

3.2.3 Пневмогидрокомпресійне формування

Пневмогідрокомпресійне формування використовує тиск газу або рідини на препрег через еластичну герметичну діафрагму. Найпростіший варіант - *упруге формування вакуумуванням* (рис. 3.13), де на форму укладається технологічний пакет з композиту та допоміжних шарів, накривається герметичною оболонкою, притискається по краях, після чого з-під оболонки відкачується повітря.

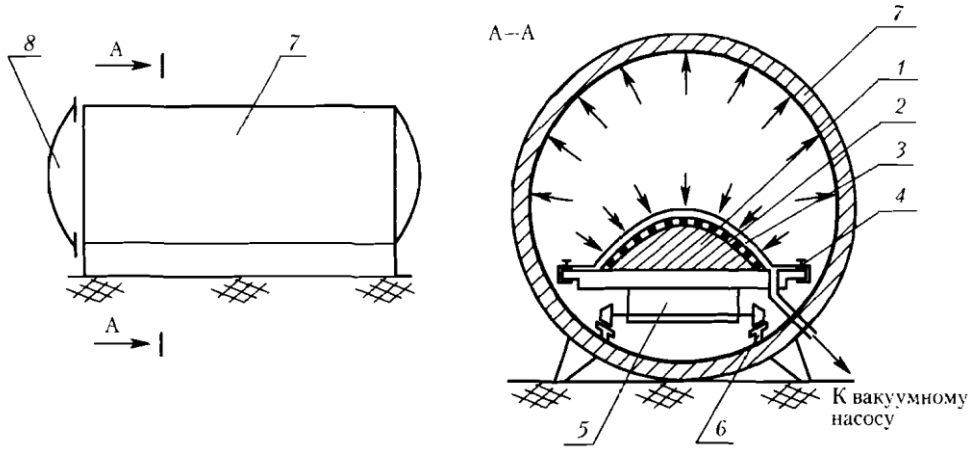


1 - форма (оснащення): 2 - герметична оболонка; 3 - препрег; 4 - герметизуючий джгут; 5 - затискачі

Рисунок 3.13 – Формування вакуумуванням [10]

Метод простий у реалізації та безпечний, підходить для деталей будь-яких розмірів. Єдиний суттєвий недолік - обмеження тиску формування однією атмосферою (1 кг/см²), що може бути недостатньо для деяких видів виробів.

Автоклавне формування (рис. 3.14) здійснюється у спеціальному обладнанні - автоклаві, що являє собою герметичну циліндричну ємність з кришкою. В автоклаві створюється надлишковий тиск до 15 атм і температура до 300°С за допомогою насосів чи випаровування рідкого азоту і нагрівальних елементів або аеродинамічного нагріву.



1 - форма; 2 - препрег; 3 - еластична мембрана; 4 - ущільнювачі; 5 - візок; 6 - рейки; 7 - корпус автоклава; 8 - кришка

Рисунок 3.14 – Формування в автоклаві [10]

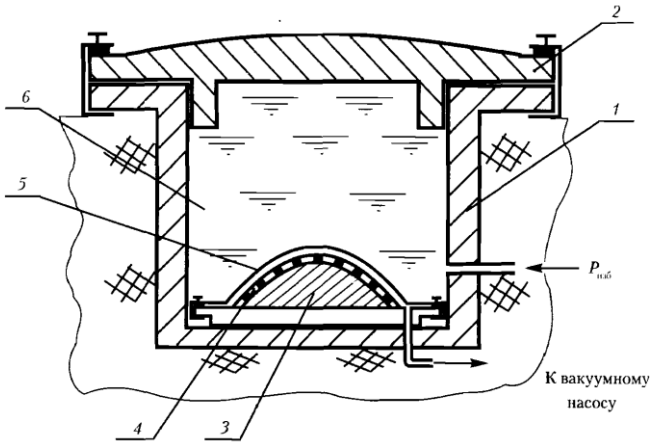
Автоклави обладнані системами числового управління для контролю параметрів процесу. Стандартні розміри для авіаційної промисловості: діаметр до 3 м, довжина 10-12 м. Метод універсальний і дозволяє формувати вироби різних розмірів та складності з рівномірним тиском по всій поверхні.

Основні недоліки - висока вартість обладнання, великі енерговитрати та вибухонебезпечність. Проте, завдяки своїм перевагам, це найпоширеніший метод формування в авіабудуванні.

Гідроклавне формування (рис. 3.15) проводиться у вертикальних циліндричних ємностях (гідроклавах), які частково заглиблюють у ґрунт. Як робоче середовище використовують гліцерин або кремнійорганічні масла, що можуть нагріватися до 200-250°С без газоутворення. Спочатку виконується формування вакуумуванням, потім форма з препрегом і герметичною оболонкою розміщується в гідроклаві для витримки при заданих температурі та тиску.

Перевагами методу є можливість створення високого тиску (30-50 атм) та безпечність роботи. Проте гідроклави мають менші розміри порівняно з

автоклавами, а використання рідкого середовища створює незручності в роботі та знижує культуру виробництва.



1 - корпус; 2 - кришка; 3 - форма; 4 - препрег; 5 - герметична діаграма; 6 - робоча рідина

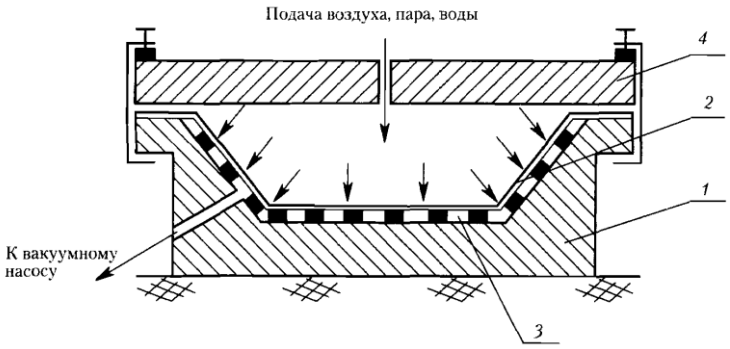
Рисунок 3.15 – Гідроклав [10]

Формування в прес-камерах (рис. 3.16) відбувається наступним чином: в негативну форму, що одночасно є міцним корпусом, укладається препрег та еластична оболонка. Повітря з-під оболонки відкачується, а в простір між оболонкою і кришкою подається робоче середовище (розігріта пара, вода або повітря).

Особливості методу:

- Можливість створення тиску 20-30 атм
- Менші енерговитрати порівняно з авто- та гідроклавами через малий об'єм камери
- Відсутність універсальності обладнання

Метод доцільно використовувати при великосерійному виробництві однотипних виробів.

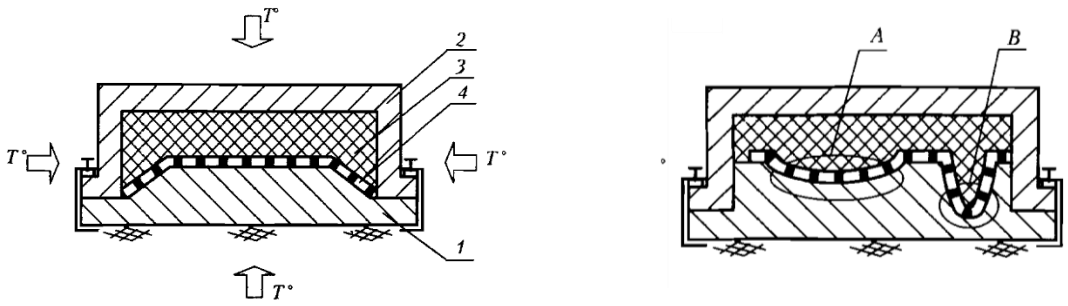


1 - форма; 2 - еластична діафрагма; 3 - препрег; 4 - кришка

Рисунок 3.16 – Формування в прес-камері [10]

3.2.4 Термокомпресійне формування

Термокомпресійне формування (рис. 3.17) базується на властивості кремнійорганічної гуми значно збільшувати об'єм при нагріванні. Процес відбувається наступним чином: препрег укладається на форму нижньої частини контейнера, зверху встановлюється верхня частина з вкладишем із кремнійорганічної гуми. При нагріванні в печі вкладиш розширюється і створює тиск до 30 атм на матеріал, що формується.



а б

1, 2 - нижня і верхня частини контейнера; 3 - кремнійорганічна гума; 4 - препрег

Рисунок 3.17 – Термокомпресійне формування [22]

Переваги методу:

- Висока ефективність
- Значний тиск формування
- Висока культура виробництва

Недоліки:

- Малий ресурс вкладишів через руйнування при багаторазовому навантаженні
- Нерівномірність тиску при складному рельєфі деталі [22]

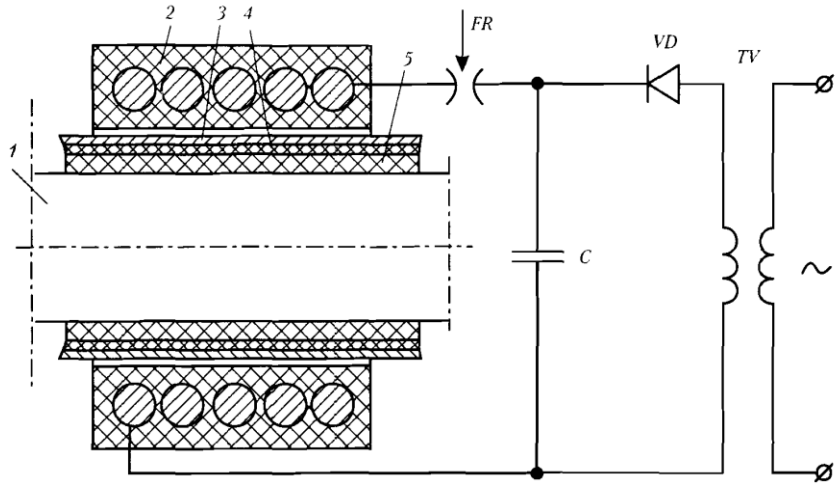
Для покращення якості виробів застосовують комбіновані способи формування. Наприклад, поєднання термокомпресійного та автоклавного методів: у форму з препрегом встановлюють гумові вкладиші, накривають герметичною оболонкою, видаляють повітря і створюють тиск та температуру в автоклаві. Формування відбувається одночасно під дією тиску повітря та розширення гуми.

3.2.5 Магнітоімпульсне формування

Магнітоімпульсне формування базується на використанні енергії магнітного поля для створення тиску на заготовку. Електрична енергія, накопичена в конденсаторах, перетворюється при розряді через індуктор у магнітоімпульсне поле. Тиск передається через металеву деталь, яка деформується під дією магнітного поля. При швидкому розряді конденсаторів через індуктор створюються вихрові струми в технологічній деталі, що призводить до виникнення відштовхуючих сил.

Технологічний процес (рис. 3.18) починається з намотування препрегу на оправку з алюмінієвого сплаву, покриту фторопластом. Зверху встановлюється розрізана гумова труба товщиною 1 мм та намотується алюмінієва фольга 0,2 мм у два шари. Підготовлений пакет нагрівають до 250-

270°C і розміщують в індукторі. При розряді батареї фольга деформується і створює тиск формування через гуму.



1 - оправка; 2 - магнітний індуктор (технологічний інструмент); 3 - металічна фольга (супутник); 4 - гумовий прошарок; 5 - полімерна труба; TV - підвищувальний трансформатор; C - батарея конденсаторів; VD - випрямляч; FR - розрядник.

Рисунок 3.18 – Схема пристрою для магнітно-імпульсного формування трубчастих стрижнів [9]

Метод дозволяє досягати тиску 180-190 МПа при питомій енергії 1,1-1,2 × 10^9 Дж/м³. Робоча зона складає 100-250 мм, що вимагає послідовного формування для довгих виробів. Швидкість обробки становить 30-60 секунд на метр довжини [10].

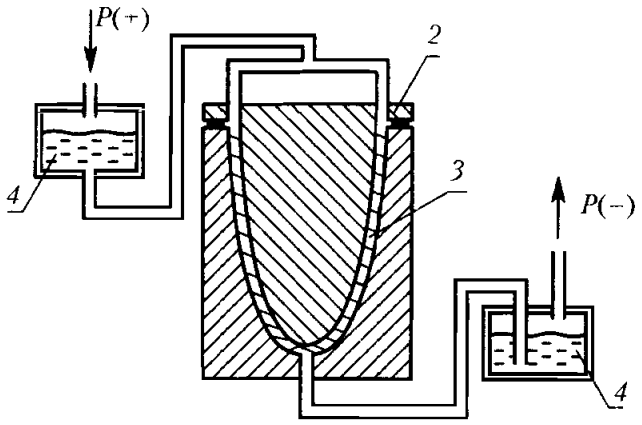
Основними перевагами є універсальність, проста оснастка, відсутність рухомих частин, можливість створення рівномірного тиску до 350-400 МПа та висока швидкість деформування 50-200 м/с. Метод особливо ефективний при виготовленні циліндричних порожнистих деталей з термопластичною матрицею.

3.2.6 Просочування заготовок

Формування методом просочення заготовок включає два основні етапи:

1. Формування "сухого" пакету з армуючих матеріалів (тканин, джгутів)
2. Просочення пакету зв'язуючим під тиском

Просочення в замкнутих формах (рис. 3.19) передбачає розміщення армуючого матеріалу між позитивною та негативною формами. У зазор між формами під тиском подається зв'язуюче, одночасно з цього простору відкачується повітря. Цей метод забезпечує високу якість поверхонь виробу, однорідність і міцність матеріалу. Проте він має суттєві недоліки: висока вартість форм та обмеження щодо габаритів і складності конфігурації виробів.



1, 2 - нижня і верхня форма; 3 - прес; 4 - ємність зі сполучною речовиною

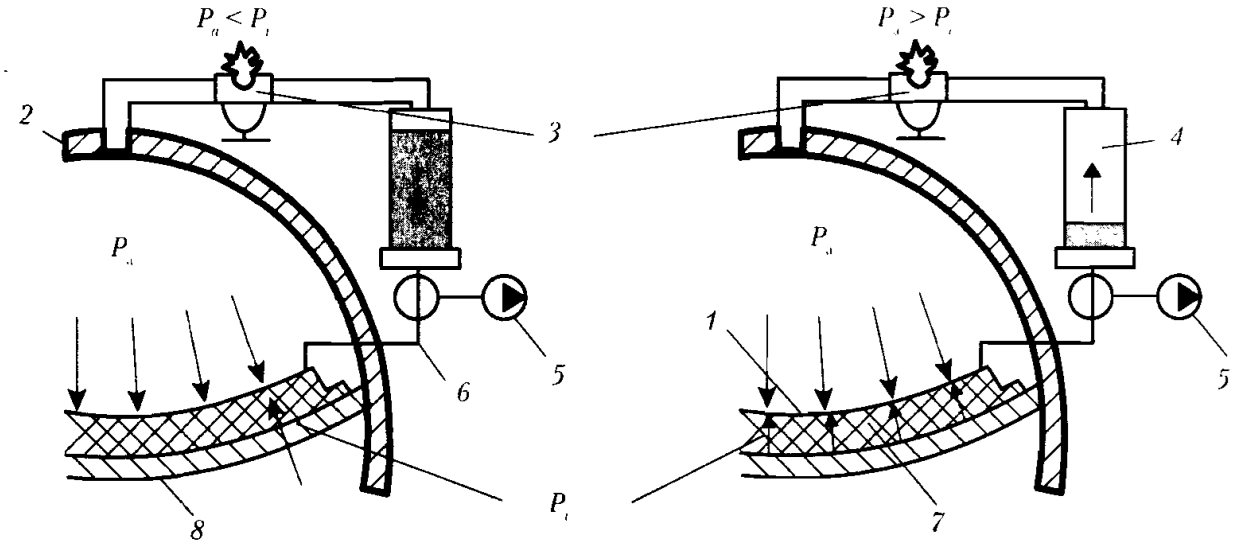
Рисунок 3.19 – Формування просоченням під тиском [22]

Просочення у відкритих формах, також відоме як трансферне або інжекційне формування, виконується наступним чином: на форму викладається пакет сухої армуючої тканини, який потім накривається герметичним чохлом. Форма поміщається в автоклав. Процес формування відбувається у два етапи (рис. 3.20): спочатку проводиться інжекція зв'язуючого під тиском при створенні розрідження в порожнині під чохлом,

після чого тиск в автоклаві підвищується для ущільнення пакету. Цей метод дозволяє виготовляти більш габаритні та складні вироби порівняно з формуванням у замкнутих формах.

Переваги трансферного методу:

- Якість порівнянна з препреговою технологією
- Низька пористість
- Можливість регулювання вмісту волокна
- Не потребує дорогих форм
- Відсутні обмеження по термінах переробки
- Висока екологічна чистота
- Підходить для великогабаритних виробів



а - фаза ін'єкції; б - фаза формування;

1 - вакуумна фольга; 2 - автоклав; 3 - редукційний клапан; 4 - ємність для єднальної речовини; 5 - вакуумна система; 6' - трубопровід для вакуумної системи та сполучної речовини; 7 - вуглецевий матеріал; 8 - формоутворювальне оснащення.

Рисунок 3.20 – Ін'єкційний спосіб виготовлення панелей [22]

3.3 Температурний режим формування

Не менш важливим параметром формування ніж тиск є режим нагрівання. При виборі температури нагріву визначальною є вимога до умов полімеризації сполучного. Крім того, на швидкість нагріву впливає конструкція виробу та формотворчого оснащення.

Під час виробництва виробів із композитів використовують сполучні холодного і гарячого затвердіння.

Для компаундів холодного затвердіння достатньо кімнатної температури (20 °С). Необхідний час полімеризації приблизно 24 год.

Для отримання конструкційних композитів найчастіше застосовують смоли гарячого затвердіння. Вони забезпечують матеріалу більш високу міцність і стабільність характеристик у часі. Для полімеризації таких смол потрібна температура від 120 до 200 °С залежно від типу смоли. Потрібний час витримки при температурі від двох до шести годин.

Істотний вплив на якість виробу має швидкість нагріву.

Повільне нагрівання й охолодження рекомендується в таких випадках:

- за великої товщини виробу;

- для формування конструкцій інтегрального типу з елементами різної товщини та об'єму;

- у разі використання масивного товстостінного оснащення.

У всіх цих випадках розтягнуте в часі підведення тепла дає змогу прогрівати матеріал і оснащення рівномірно за обсягом. При цьому зводяться до мінімуму температурні деформації і залишкові технологічні напруги. Крім того, повільне нагрівання сприяє повному виділенню з препрега летких (газоподібних) фракцій розчинника.

На рис. 9.94 наведено характерний графік нагріву під час формування. Препрег з оснащенням нагрівається за ступінчастим графіком. На

горизонтальних ділянках відбувається поступове прогрівання матеріалу і вирівнювання температури за об'ємом.

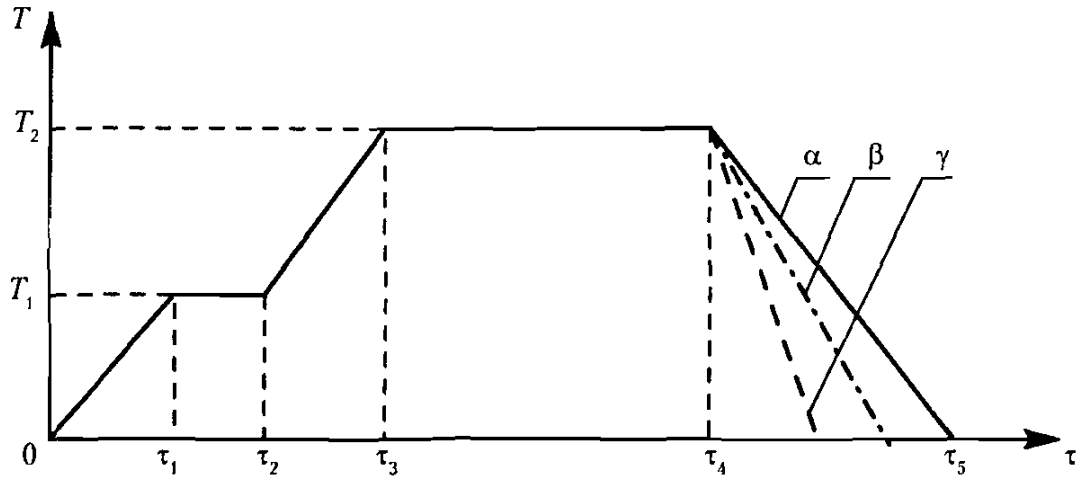


Рисунок 3.21 – Типовий графік нагріву під час формування [4]

Можна виокремити такі методи нагрівання: конвективний, струмами високої частоти, променевою енергією, прямою теплопередачею.

У виробничій практиці температурний режим задається у вигляді дво-, три- або чотириступеневої ламаної лінії (рис. 3.21). Графік нагріву забезпечується за допомогою автоматичних приладів.

На ділянці 0 – τ_1 температура підвищується до величини T_1, за якої починається інтенсивне виділення летких продуктів, але затвердіння зв'язувального ще не відбувається. Для сполучних на епоксидній або фенольній основі T_1 = 80-100 °С. Протягом часу τ_1 - τ_2 здійснюється вирівнювання температури по товщині стінки виробу і оснащення та остаточне видалення летких продуктів. За час τ_2 - τ_3 температура теплопередавального середовища підвищується до величини, що відповідає затвердінню сполучного. Процес затвердіння протікає в діапазоні часу τ_3 - τ_4. На ділянці τ_4 - τ_5 виріб охолоджується: α - разом із піччю; β - на повітрі з оснащенням; γ - на повітрі без оснащення.

Низька теплопровідність композиційного матеріалу зумовлює необхідність повільної зміни швидкості нагріву та охолодження. Так, для

виробів зі склопластику з товщиною стінки до 10 мм швидкість зміни температури в печі не повинна перевищувати 0,025-0,03 град/с [9]. Загальний цикл термообробки склопластикового виробу 16-20 год. Для здійснення всіх інших операцій технологічного процесу потрібно не більше 30-40% цього часу.

3.4 Залежність експлуатаційних характеристик склопластикових виробів від технології їх виготовлення

Технологія виготовлення склопластикових виробів методом намотки має суттєвий вплив на їх експлуатаційні характеристики. Під час експлуатації труб для транспортування рідин або газів під тиском виникають різні напруження в стінках - поперечні напруження вдвічі перевищують поздовжні. При використанні труб як водопідйомних колон спостерігаються рівні напруження в обох напрямках. Якщо ж труби використовуються як стійки чи флагштоки, поздовжні напруження значно перевищують поперечні [23].

Ключовим параметром є коефіцієнт анізотропії (K_α), який повинен знаходитися в межах від 0,6 до 5. Ці обмеження зумовлені технологічними особливостями виробництва. При зменшенні K_α збільшується кількість поздовжнього армування, що призводить до погіршення просочування, зниження монолітності та загальної якості виробу. Це пов'язано з технологією подачі зв'язуючого, яке подається разом з поперечним армуючим матеріалом, тоді як поздовжній матеріал просочується вже на оправці. З іншого боку, надмірне збільшення K_α призводить до того, що основне навантаження в поздовжньому напрямі припадає на зв'язуюче, яке має значно нижчі показники міцності порівняно з композиційним матеріалом (табл. 3.1).

В процесі досліджень вивчався вплив різних технологічних параметрів: температури та часу тверднення, використання електричних або

інфрачервоних нагрівачів, геометричних параметрів виробу (товщина стінки, діаметр труби), ширини бази укладки поздовжнього армуючого матеріалу, кількості примоточного і підмоточного поперечного армуючого матеріалу.

Таблиця 3.1 – Вплив значення анізотропії K_α на показники експлуатації

Показник	Коефіцієнт анізотропії, K_α		
	1,2	2	3
Руйнівне напруження при стиску, поздовжнє, МПа	409	349	233
Руйнівне напруження при розтягу, поздовжнє, МПа	320	262	165
Руйнівне напруження при розтягу, кільцеве, МПа	362	475	507
Руйнівне напруження при стиску, кільцеве, МПа	180	160	150
Модуль пружності осьовий, МПа	14110	13465	12285

Досліджувана композиція включала епоксидний олігомер CHS-Epoxy 520, модифікований метилтетрагідрофталевий ангідрид як твердник гарячого затвердіння, та прискорювач 2,4,6-трис (діметиламінометил)фенол. Додатково використовувались модифіковані теплостійкі зв'язні типу КДА-ХІт та модифікатори на поліуретановій основі.

Отримані вироби демонструють ряд важливих переваг. З конструкційної точки зору вони мають високу міцність при малій масі та надійні в широкому температурному діапазоні від -40 до +50°C. Експлуатаційні характеристики включають високу атмосферостійкість, хімічну стійкість, стійкість до корозії та гниття. Важливими є також монтажні переваги: знижені транспортні витрати, спрощені вантажні операції, полегшений монтаж та відсутність необхідності у зварювальних роботах завдяки використанню фланцевих або муфтових з'єднань.

Проведені дослідження показали, що зміною технологічних параметрів можна досягти підвищення фізико-механічних властивостей виробів на 5-10%, що має важливе практичне значення для промислового виробництва склопластикових труб та конструкцій.

При дослідженні руйнівних напружень в склопластикових виробах було виявлено, що їх значення в поздовжньому і поперечному напрямах мають близькі показники та досягають практично максимальних значень при коефіцієнті анізотропії, що дорівнює 1,2. Виходячи з цього, виробництво продукції з коефіцієнтом анізотропії нижче одиниці є недоцільним, оскільки це не забезпечує суттєвого приросту міцності, але значно погіршує якість виробу.

Дослідження показали, що для горизонтального транспортування рідини чи газу під тиском найкраще підходять вироби з коефіцієнтом анізотропії, що дорівнює 2. При такому значенні кільцеве руйнівне напруження вдвічі перевищує поздовжнє, що відповідає експлуатаційним вимогам. При подальшому збільшенні коефіцієнта анізотропії від 2 до 3 спостерігається уповільнення зростання кільцевого руйнівного напруження, тоді як напруження в поздовжньому напрямі починає різко знижуватися. На основі цих даних можна зробити висновок, що виготовлення склопластикових виробів з коефіцієнтом анізотропії більше 3 є технічно необґрунтованим.

Варто зазначити, що модуль пружності також залежить від коефіцієнта анізотропії, проте ця залежність не має такого суттєвого впливу на експлуатаційні характеристики виробів.

В ході досліджень також вивчалася залежність експлуатаційних показників від складу композицій. Особлива увага приділялася можливості використання отриманих труб для транспортування рідин під високим тиском. Основними завданнями було покращення герметичності труб та зниження їх крихкості. Для вирішення цих задач до складу вихідного зв'язного вводились поліуретанові модифікатори типу Пластур та УРЕП.

При оцінці експлуатаційних характеристик склопластикових труб проводились випробування на гідростенді СГІ-99, що моделює реальні умови експлуатації. Під час випробувань відстежувались два ключові показники:

- Напруження "першого тріску" - це внутрішнє напруження в трубопроводі, при якому: з'являється характерний звук; відбувається початкове порушення цілісності виробу; при цьому герметичність може зберігатися.
- Напруження втрати герметичності - це значення, при якому з'являються перші сліди випотівання або свищі; подальше випробування стає неможливим; виріб втрачає експлуатаційну придатність при вищому напруженні.

В рамках комплексного дослідження склопластикових труб були проведені додаткові випробування для визначення їх механічних характеристик. Руйнівне напруження при кільцевому розтягу визначалось відповідно до стандарту ASTMD 2290-76, який передбачає розтягнення кільцевих зразків труб по їх площині за допомогою внутрішнього тиску, створюваного жорсткими напівдисками випробувальної машини. Паралельно проводились випробування для визначення показника ударної в'язкості зразків труб.

Результати досліджень продемонстрували, що введення модифікаторів Пластур і УРЕП до складу композицій призводить до суттєвого покращення експлуатаційних характеристик. Найбільш значущим виявилось підвищення показника ударної в'язкості затверднених зв'язних, яке склало від 50 до 100 відсотків порівняно з немодифікованими зразками. Також спостерігалось помітне збільшення руйнівного напруження при кільцевому розтягу.

Важливим результатом стало покращення показників, пов'язаних з герметичністю труб. Зокрема, підвищилось значення напруження, при якому відбувається втрата герметичності, а також зросло напруження "першого тріску". Це свідчить про підвищення загальної надійності та довговічності виробів.

На основі проведених досліджень було встановлено, що оптимальний вміст модифікаторів Пластур і УРЕП у складі композицій повинен становити від 5 до 10 відсотків за масою. При такому співвідношенні компонентів досягаються найкращі показники міцності, герметичності та ударної в'язкості склопластикових труб.

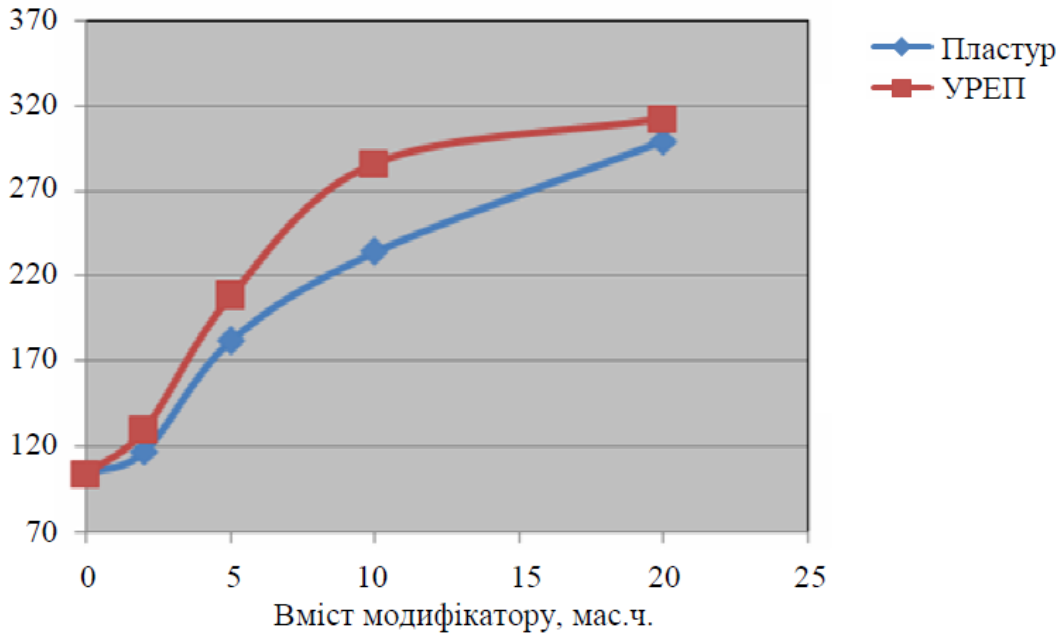


Рисунок 3.22 – Залежність напруження втрати герметичності склопластикових труб від типу та кількості модифікатору в зв’язних

В ході досліджень було виявлено, що додавання модифікаторів Пластур та УРЕП призводить до суттєвого покращення фізико-механічних характеристик склопластикових труб. Зокрема, показник ударної в'язкості зріс з початкових 7 кДж/м² до 20-25 кДж/м². Значно підвищилось напруження "першого тріску" - з 70 МПа до 170 МПа. Також спостерігалось істотне збільшення напруження втрати герметичності - зі 100 МПа до 280-300 МПа.

Важливим досягненням стало підвищення деформаційної теплостійкості затверднених зв'язних. Завдяки використанню модифікаторів Пластур та УРЕП цей показник зріс зі 110°С до 170°С, що значно розширило температурний діапазон експлуатації труб.

На підставі проведених досліджень були встановлені оптимальні технологічні параметри та розроблені склади композицій, які забезпечують найкращі експлуатаційні властивості склопластикових труб. Отримані результати дозволяють рекомендувати використання цих труб у комунальному господарстві та промисловості для транспортування різних холодних та гарячих рідин і газів під тиском до 6,7 МПа.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Безпека праці при виробництві композитних матеріалів на основі епоксидних смол є важливим аспектом організації технологічного процесу. Особлива увага до питань охорони праці обумовлена специфікою використовуваних матеріалів, зокрема наявністю в технологічному процесі епоксидних смол та їх компонентів, які належать до токсичних речовин, а також скляних волокон, що можуть спричиняти механічне подразнення.

У цьому розділі розглядаються потенційні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які виникають при проведенні досліджень процесу формування композитного матеріалу з епоксидної матриці та скляних волокон. Аналізуються можливі ризики для здоров'я працівників та заходи щодо їх мінімізації. Особлива увага приділяється організації безпечних умов праці в лабораторії, де проводяться дослідження, та на виробничих ділянках, де здійснюється формування композитних матеріалів.

Наведені рекомендації щодо використання засобів індивідуального захисту, організації робочих місць, забезпечення належної вентиляції приміщень та інших заходів безпеки відповідають вимогам чинних нормативних документів з охорони праці. Також розглядаються питання пожежної безпеки та заходи щодо захисту навколишнього середовища при роботі з епоксидними композиціями.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

Небезпеки які пов’язані з порушеннями роботодавцями вимог

НПАОП 0.00 – 7.11 – 12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників», а саме [24]:

а) небезпеки які пов’язані, з порушенням вимог ергономіки стосовно, організації робочих місць дослідників в приміщенні дослідницької лабораторії, зокрема невідповідності розмірів робочих зон, а також максимально можливої кількості осіб, що можуть там перебувати, нераціонального розташування дослідницького приладдя та офісного обладнання;

б) можливість ураження електричним струмом, при виконанні службових обов’язків внаслідок порушення правил з електробезпеки, несправності енергоспоживаючого обладнання, відсутності групових або індивідуальних засобів захисту, що може призвести до електричних травм або летального наслідку;

в) небезпеки які пов’язані із обробкою результатів досліджень із використанням ПК, зокрема ушкодження кістково-м’язового апарату внаслідок довготривалої роботи в однотипній позі, що може призвести до зниження працездатності та розвитку професійних захворювань;

г) можливість отримання механічних травм при підготовці зразків або дослідницьких виробів до термічної обробки що може бути пов’язано з порушеннями правил охорони праці під час роботи з абразивним інструментом зокрема: використання абразивного інструменту який не пройшов випробування, порушення правил експлуатації, що може призвести до тяжких травм;

д) небезпеки які пов’язані з роботою із епоксидними смолами, які можуть може призвести до втрати працездатності працівника внаслідок випаровування токсичних компонентів;

е) незадовільні параметри мікроклімату які повинні відповідати фізіологічним потребам організму працюючих, із врахуванням енергетичних витрат на виконувану роботу внаслідок неефективної роботи систем опалення та повітрообміну, що може призвести до загальних захворювань;

є) невідповідність вимогам освітлення робочих зон дослідницької лабораторії внаслідок виходу з ладу освітлювальних приладів або хибного розрахунку їх кількості та потужності, що може призвести до погіршення зору;

ж) можливість загоряння внаслідок порушень правил пожежної безпеки, а саме хибне визначення видів та кількості первинних засобів пожежогасіння відносно категорій приміщень с пожежної безпеки, що може привести до пожежі;

з) невиконання інженерно-технічні заходи цивільної оборони, що забезпечують тривалу роботу цеху у військовий час [25].

4.2 Заходи забезпечення безпеки

а) конструкція робочого місця дослідника має відповідати сучасним вимогам ергономіки і забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні пристроїв і документів, які необхідні для виконання досліджень. Висота робочої поверхні робочого столу ВДТ має регулюватися в межах 680…800мм, а ширина і глибина –забезпечувати можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: 600…1400 мм, глибина –800…1000мм).Робочий стіл повинен мати простір для ніг заввишки не менше ніж 600 мм, завширшки не менше ніж 500 мм, завглибшки (на рівні колін) не менше ніж 450 мм, на рівні простягнутої ноги - ніж 650 мм.

б) до основних заходів захисту людини від ураження електричним струмом, відносять:

– забезпечення неможливості випадкового дотику до струмоведучих частин, що перебувають під напругою;

– електричний розподіл мережі;

– усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусах, кожухах та інших частинах електроустаткування, що досягається захисним заземленням, зануленням і захисним відключенням;

– використання малих напруг;

– захист від випадкового дотику до струмоведучих частин кожухами, огородженням або подвійною ізоляцією;

– захист від небезпек можливих при переході напруги з вищої сторони на нижчу;

– контроль і профілактика пошкоджень ізоляції;

– компенсація ємнісної складової струму замикання на землю;

– застосування спеціальних електрозахисних засобів, блокувань, сигналізації та запобіжних пристроїв;

–організація безпечної експлуатації електроустановок.

Використання захисного заземлення:

– робоче заземлення – це заземлення струмоведучих частин електроустановки, яке виконане для забезпечення роботи електроустановки (не з метою електробезпечності), наприклад, робоче заземлення нейтрали трансформатора;

– заземлення блискавкозахисту – це заземлення блискавкоприймача, з метою захисту об’єкта від прямого удару блискавки;

– захисне заземлення – це заземлення, яке виконане з метою електробезпечності, тобто з’єднання відкритих провідних частин (ВПЧ) із заземлювачем для захисту від непрямого дотику та від наведеного напруги.

в) об’єкти відмінності мають як негативний (темні об’єкти на світлому фоні) так і позитивний (світлі об’єкти на темному фоні) контраст. Тому відбувається постійна переадаптація від яскравих об’єктів з позитивним контрастом на темні з негативним контрастом. За восьмигодинний робочий день за монітором користувач кидає приблизно 30000 поглядів на екран, око працює з перевантаженням і не може достатньо адаптуватися до цієї ситуації.

Такі особливості призводять до напруження м’язового та світло-сприймаючого апарату очей, що є однією з причин виникнення астенопічних явищ (різь в очах, біль в очах, ломить у надбрівній ділянці, розпливчастість контурів, нечіткість зображення).Постійний погляд на матове скло екрана монітора зменшує частоту кліпання очей, що призводить до висихання та викривлення роговиці ока, погіршує зір (синдром Сікка).Робота користувача за пульсуючим екраном монітора, що не відповідає нормативним вимогам щодо обмеження пульсації (блимання), викликає дискомфорт і втому (загальну і зорову).Робота з дзеркальною відбиваючою і неплоскою зовнішньою поверхнею екрана монітора, на якій з’являються численні відбиті відблиски, призводить до виникнення у користувача астенопічних явищ та функціональних змін ока. Неправильний розподіл яскравості в полі зору, тобто поверхні периферії (стеля, стіни, меблі і т.п.) висвітлені краще ніж центр поля зору, призводить до порушення основних зорових функцій ока. Засліплююча дія світильників у приміщенні, на робочому місці з ПК викликає не тільки астенопічні явища, але й функціональні порушення очей користувача.

Кольоровий шрифт збільшує навантаження на зір, оскільки складові кольорів мають різні довжини хвиль і видимі на різній віддалі. Око потребує точнішої адаптації, ніж при чорно-білому зображенні.

г) для уникнення механічних травм при виготовленні зразків необхідно працювати на справному станку, своєчасно проводити заміну деталей, термін експлуатації яких вже закінчився та використовувати захисні окуляри та рукавиці; для виключення травмування органів зору передбачено застосування захисних окулярів, які служать для захисту очей від ушкоджень частками твердих тіл, що летять попереду, знизу і збоку. Ці окуляри оснащені фігурними боковинами, що відкидаються. Застосовувати прозорий екран для захисту очей робітника від поранень частками, що відлітають.

д) При роботі з епоксидною смолою важливо враховувати її специфічні властивості та вимоги безпеки. Хоча матеріал не є вибухонебезпечним, він може загорятися при контакті з відкритим вогнем. У складі смоли містяться

леткі компоненти - толуол та епіхлоргідрин, які відносяться до речовин 2-го класу небезпеки та можуть бути виявлені тільки за допомогою аналітичних методів.

Всі роботи з епоксидними смолами повинні проводитися в спеціально обладнаних приміщеннях, оснащених припливно-витяжною вентиляцією, яка забезпечує восьмикратний обмін повітря. Обов'язковою є наявність умивальників з гарячою та холодною водою. Працівники повинні бути забезпечені спеціальним одягом та засобами індивідуального захисту відповідно до ДСТУ 3042-2005.

При роботі зі смолами існує ризик виникнення дерматиту при контакті незатверділої смоли зі шкірою, в деяких випадках можливі алергічні реакції. Категорично забороняється використовувати розчинники для миття рук. У випадку потрапляння бризок смоли на шкіру, їх необхідно негайно видалити сухими марлевими тампонами, після чого обробити уражене місце етиловим спиртом, ретельно промити водою з милом, осушити паперовим рушником одноразового використання та нанести м'яку мазь.

Враховуючи, що температура спалаху смоли становить понад 270°С, необхідно забезпечити наявність відповідних засобів пожежогасіння: вуглекислотних та порошкових вогнегасників, води, пару, інертного газу, азбестового полотна та піску. Всі операції з відбору проб, промивки та обробки апаратури повинні проводитися відповідно до затверджених правил безпеки з виробництва пластичних мас та встановлених санітарних норм [26-29].

4.3 Заходи з виробничої санітарії

а) параметри мікроклімату і чистоти повітря визначають в залежності від категорії фізичних робіт, для певних робочих місць (постійних і

непостійних).Постійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться понад 50% робочого часу або більше 2-х годин безперервно. Якщо при цьому робота здійснюється в різних пунктах робочої зони, то постійним робочим місцем вважається вся ця зона. Непостійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться менше 50% робочого часу або менше 2-х годин безперервно.

Необхідно враховувати, що:

– для постійних робочих місць визначаються оптимальні та допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року;

– для непостійних робочих місць визначаються тільки допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року.

– в холодний період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 18-20 °С, допустима 17-23 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60 %, допустима 75 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,2 м/с, допустима не більше 0,3 м/с;

– в холодний період року на непостійних робочих місцях допустима температура: 15-24 °С; допустима відносна вологість: 75 %; допустима швидкість переміщення повітря: не більше 0,3 м/с;

– в теплий період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 21-23 °С, допустима 18-27 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60 %, допустима 40-60 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,3 м/с, допустима не більше 0,2-0,4 м/с;

– в теплий період року на непостійних робочих місцях допустима температура 17-29 °С; допустима відносна вологість: 65 % 45при температурі 26 °С; допустима швидкість переміщення повітря: 0,2-0,4 м/с.

б) Виробниче освітлення організується і нормується залежно від:

– розряду зорової роботи, тобто її характеристики (найменшого розміру об’єкта який різниться, світлості фону, контрасту об’єкта з фоном);

– виду і системи освітлення.

Також необхідно врахувати, що передбачається оптимальне (необхідне) освітлення виробничих приміщень і робочих місць:

– природне (бокове або верхнє);

– штучне: робоче, аварійне, евакуаційне, охоронне, чергове [30-31].

4.4 Заходи з пожежної безпеки

Категорію виробництва за пожежною небезпекою (А, Б, В, Г, Д) споруд (приміщень) цеху (ділянки, підстанції) визначають на основі аналізу речовин і матеріалів, що використовуються у виробництві, відповідно до категорії виробництва з пожежної небезпеки, визначають ступінь вогнестійкості приміщення цеху (дільниці, підстанції).

Охоронно-пожежна сигналізація неадресного типу влаштована на неадресних (порогових) датчиках. Обладнання розраховане на цілодобову роботу і відповідає необхідним вимогам пожежної безпеки. До складу системи ОПС входить панель, блок управління і індикації та програмне забезпечення.

Панель системи ОПС призначена для прийому сповіщень від шлейфів сигналізації з пожежними та охоронними сповіщувачами або інших приладів, перетворення сигналів, видачі сповіщень про пожежу і/або проникненні з включенням оповіщення та інших виконавчих пристроїв і передачі сповіщень на пульт централізованого спостереження.

Система ОПС на неадресних (порогових) сповіщувачах дозволяє:

– контролювати стан пожежних, охоронних шлейфів сигналізації;

– видавати повідомлення про пожежу та/або проникненні на блоці індикації;

– включати систему оповіщення та інші виконавчі пристрої комплексної системи безпеки;

– передавати повідомлення на Пульт централізованого спостереження, якщо він передбачений проектом.

Разом із системою ОПС можуть працювати такі види охоронних датчиків, як:

– інфрачервоні, що реагують на рух;

– магнітоконтактні, що реагують на розмикання дверей;

– акустичні, що реагують на розбивання скла.

Порогова охоронно-пожежна сигналізація – може працювати як автономно, так і в складі комплексної системи безпеки спільно з відеоспостереженням, контролем доступу і системою підвищення ефективності управління. Істотно розширюються можливості по управлінню обладнанням і обробці інформації, що надходить - при наявності модулів «Моніторинг» або «Центральний пост» на моніторі охоронця автоматично видається інформація про пожежу із зазначенням місця його виникнення на графічному плані підприємства. В охоронюваних приміщеннях встановлюються порогові пожежні або охоронні сповіщувачі, які об’єднуються в шлейфи сигналізації [32-33].

4.5 Заходи безпеки в умовах НС

Підвищення міцності промислових споруд, а також їх стійкості до дії ударної хвилі, по-перше, пов’язано із значними затратами, а по-друге, все ж неповністю гарантують їх збереження в епіцентрі ядерного вибуху. У зв’язку із цим проведення робіт по зміцненню тих чи інших споруд може плануватись і здійснюватися лише в цілях захисту особливо цінного, унікального обладнання або в тих випадках, коли окремі важливі споруди мають значно меншу міцність, ніж інші, і «підтягнувши» їх міцність до середніх по заводу величин, можна без великих затрат підвищити стійкість об’єкту в цілому.

Вибір заходів, які забезпечують підвищення стійкості об’єкту, визначається різними місцевими умовами в кожному конкретному випадку. Найбільш ефективними являються заглиблення, зменшення парусності і висоти споруд. Міцність і жорсткість конструкцій можна підвищити встановленням контрфорсів, підкосів, додаткових рамних конструкцій, розпірок і відтяжок. Стійкість незначних по розмірам споруд підвищується шляхом обсипки нижньої частини їх стін ґрунтом (піском і т.п.). Цей же спосіб значно підвищує захисні властивості споруд по відношенню до дії радіаційних випромінювань.

Захист обладнання і готової продукції передбачає розміщення деяких видів обладнання і продукції у заглиблення в приміщеннях, а також підготовку індивідуальних захисних пристроїв.

Надійно захистити все обладнання від впливу ударної хвилі практично неможливо, оскільки доводити міцність цехових споруд до захисних властивостей сховищ економічно недоцільно. Задача полягає в тому, щоб звести до мінімуму небезпеку руйнування і пошкодження особливо цінного обладнання, унікальних шліфувальних, токарних, розточних і зубофрезерних станків, пресів і кувальних машин, насосного обладнання, розрахунково-аналітичних машин і т. д.

Для зменшення руйнування обладнання підсилюють його найбільш слабкі деталі та вузли, виготовляють їх з’ємними і створюють запаси для заміни пошкоджених. Стійкість обладнання від падіння під дією ударної хвилі ядерного вибуху підвищують шляхом надійного закріплення на фундаменті, створення контрфорсів, заглиблень. Запас найбільш нестійких деталей і вузлів для важливого унікального обладнання слід утримувати в спорудах, які забезпечили б їх збереження при дії ударної хвилі.

Підвищення стійкості обладнання може бути досягнуто також шляхом заміни застарілих зразків новими, які найбільш відповідають вимогам до їх стійкості, а також скороченням числа типомоделей станків, що використовуються, що в подальшому значно спростить проведення ремонтних

і відновлювальних робіт; заміною горючих і вибухонебезпечних змащувально-охолоджувальних рідин (наприклад, сульфофрезолу, фрезолу, керосину) емульсіями; впровадженням в процеси термічної обробки с.в.ч. і т. п.

Важливе значення має і раціональне розміщення обладнання. Найбільш цінне і нестійке обладнання і прилади слід розміщувати в найбільш міцних приміщеннях, важкі станки, машини і агрегати повинні розташовуватись на нижніх поверхах споруд. Машини і станки великої цінності рекомендується розміщувати не в основних промислових, а у окремо розташованих спорудах, які мають легкі конструкції і конструкції, які важко горять, руйнування їх не приведе до руйнування цього обладнання.

Особливо велике значення має стійкість і розгалуженість систем енергетичного забезпечення (електроенергія, газо-, паро- і теплопостачання, забезпечення стисненим повітрям).

До числа заходів, які можуть бути рекомендовані для підвищення стійкості роботи систем енергопостачання, відносять: перенос інженерних і енергетичних комунікацій у підземні колектори, розміщення найбільш відповідальних пристроїв (центральні диспетчерські і розподільчі пункти, компресорні і аварійні електричні станції) в захищених спорудах з підвищеною степеню стійкості до впливу ударної хвилі; кільцювання всіх енергетичних систем; побудова захищених автономних джерел електро- і водопостачання, резервних ємностей і резервуарів; придбання пересувних електростанцій і насосних агрегатів з двигунами внутрішнього згорання; обладнання пристосувань для роботи підприємств на різних видах палива; кооперування постачання групи підприємств, тобто створення умов і можливостей для використання джерел електро-, газо-, тепло- і водопостачання, кисневих станцій, складів палива одного підприємства для забезпечення потреб іншого.

Стійкість систем електропостачання підвищується базуванням підприємств на декількох енергоджерелах, віддалених один від іншого на таку

відстань, щоб виключити можливість руйнування їх одним ядерним вибухом. При живленні підприємства від районної енергосистеми лінії електропередач необхідно підводити не менш ніж із двох напрямків, а приймальні підстанції (ЦРП, РП) розташовують одна від одної на можливо більшій відстані. Доцільні і такі заходи, як забезпечення захисту існуючих і побудова резервних підстанцій, перевід енергопостачання із повітряного на підйомно-кабельне, встановлення автоматичних роз'єднувачів для відімкнення ділянок сітей у випадку перевантаження і короткого замикання. Споруди цивільної оборони забезпечуються автономними джерелами енергопостачання.

Система водопостачання також повинна базуватися на двох і більше незалежних вододжерела, віддалених один від одного на відповідну відстань. Рекомендується встановлювати додаткові бурові свердловини (артезіанські свердловини), кільцювати розвідні сіті, захищати гідранти і водорозбірні колонки, впроваджувати автоматичні і напівавтоматичні пристрої, які б відключали б пошкоджені ділянки без порушення роботи іншої частини сіті.

На сітях газопостачання і теплофікації слід передбачити заходи проти втрачання газу (пари, води) у випадку руйнування магістральних ліній і внутрішньої сіті у пошкоджених або зруйнованих спорудах. Це досягається шляхом встановлення на вводах в споруди або на відводах магістральних ліній автоматичних запірних пристроїв, які відмикають лінії при руйнуванні. Встановлюють і задвижки дистанційного управління, які дозволяють відімкнути сіті із одного центра управління.

Сіті зв'язку можна вважати підготовленими з точки зору цивільної оборони, якщо забезпечений захист вузлів зв'язку і розподільчих шаф, а повітряні лінії зв'язку на території підприємства переведені на підземно-кабельні. Стійкість засобів зв'язку може бути підвищена шляхом прокладання другого живлення фідерів на автоматичну телефонну станцію і радіовузол заводу, придбання пересувних електростанцій для зарядки акумуляторів АТС і для живлення радіовузла при повному відключенні постійних джерел електроенергії.

Важливе значення має планове накопичення ультракороткохвильових радіостанцій, телефонних апаратів і телефонного кабелю польового типу для створення тимчасових ліній зв’язку на випадок виходу із ладу постійних. Необхідно також мати незмінний резерв запасних частин і деталей для ремонту всіх засобів зв’язку.

Попередження або зменшення до мінімуму можливих руйнувань, пожеж і втрат від додаткової дії вторинних факторів ураження ядерного вибуху в значній мірі залежать від проведення інженерно-технічних заходів, направлених на підвищення загальної стійкості всього інженерно-технічного комплексу підприємства і його окремих елементів. Крім цього, ця задача досягається розосередженням (вивозом) наднормативних запасів вибухових і вогненебезпечних речовин на безпечній відстані від самого підприємства, а також від інших населених пунктів та об’єктів. Таке розосередження вибухових та вогненебезпечних матеріалів здійснюється в основному при виникненні погрози нападу супротивника, однак уже у мирний час для цього слід підготовляти склади у загородній зоні.

Роботи із вибуховими речовинами рекомендується сконцентрувати в спеціальних окремо розташованих спорудах, щоб виключити джерела додаткової небезпеки при здійсненні цих робіт у різних цехах. На багатьох підприємствах запаси горючих рідин (нафта, бензин, керосин, масла і т. п.) містяться не в підземних сховищах, а в наземних резервуарах та інших ємностях. В цих випадках такі ємності повинні бути уже в мирний час обваловані, тобто оточені валами ґрунту такої висоти, щоб вони були здатні втримати весь об’єм рідини при руйнуванні резервуару.

Створення обмежувальних земляних валів (дамб) являється також одним із ефективних способів захисту об’єктів, розташованих в низинних ділянках місцевості, від катастрофічного затоплення в результаті руйнування поблизу розташованих гідроспоруд.

Для попередження виникнення джерел хімічного зараження можна рекомендувати наступні заходи: розосередження складів отрутохімікатів, а

також обладнання їх пристосуваннями, які забезпечують швидку нейтралізацію отруйних речовин (змивання водою; обробка залізним купоросом приміщень, небезпечних із-за наявності ціаністих сполук; обробка кислот лугами і т. п.); виготовлення міцної і надійної тари; настил підлог в складах отрутохімікатів із кислотоупорних і лугостійких матеріалів; створення запасів нейтралізуючих речовин; ізоляція (відгородження) в цехах небезпечних ділянок (травлення, ціанування, азотування та ін.); забезпечення робочих небезпечних і сумісних з ними ділянок спеціальними засобами індивідуального захисту (промислові протигази, захисний одяг) [34-35].

5 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

Розвиток сучасного ринку композитних матеріалів демонструє стійку тенденцію до зростання попиту на високоефективні та економічно доцільні рішення в різних галузях промисловості. Композитні матеріали на основі епоксидних смол, армованих скляними волокнами, займають особливу нішу на ринку завдяки оптимальному співвідношенню їх експлуатаційних характеристик та вартості.

Актуальність дослідження процесу формування таких композитів обумовлена кількома ключовими ринковими факторами:

1. Зростаючий попит у будівельній галузі на легкі та міцні конструкційні матеріали, здатні замінити традиційні металеві конструкції.
2. Активний розвиток автомобільної промисловості, де використання композитних матеріалів дозволяє знизити вагу транспортних засобів та підвищити їх енергоефективність.
3. Розширення застосування композитів у аерокосмічній галузі, де вимоги до якості та надійності матеріалів особливо високі.
4. Тенденція до екологізації виробництва, де композити на основі епоксидних смол мають перевагу завдяки можливості їх вторинної переробки.
5. Зростання інтересу до модернізації інфраструктурних об'єктів, де потрібні матеріали з високою корозійною стійкістю та тривалим терміном експлуатації.

Маркетингові дослідження показують, що удосконалення технології формування композитних матеріалів може значно розширити сфери їх застосування та підвищити конкурентоспроможність на ринку конструкційних матеріалів. Особливу увагу привертає можливість оптимізації

співвідношення "ціна-якість" шляхом вдосконалення технологічного процесу формування композиту.

Важливим аспектом є також зростаючий тренд на імпортозаміщення, де вітчизняні розробки в галузі композитних матеріалів можуть забезпечити значну економію валютних коштів та створити нові робочі місця у високотехнологічному секторі виробництва.

Таким чином, дослідження процесу формування композитних матеріалів з епоксидною матрицею та скляними волокнами є актуальним з точки зору маркетингу, оскільки відповідає сучасним потребам ринку та має значний потенціал для комерціалізації результатів досліджень у різних галузях промисловості.

5.2 Послідовний аналіз

На основі проведеного дослідження було визначено ключові сфери застосування розробленого композитного матеріалу та проаналізовано потенційні переваги для споживачів у кожному сегменті ринку (див. таблицю 5.1). Такий аналіз дозволяє чітко окреслити цільові ринки та визначити найбільш перспективні напрямки для просування продукції. Отримані результати формують стратегічне розуміння потенціалу комерціалізації розробленого композитного матеріалу та допомагають визначити пріоритетні сегменти для пошуку потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Дослідження процесу формування композитного матеріалу з матрицею із епоксидної смол та армувальних скляних волокон	- Авіаційна промисловість.	• Для авіаційної промисловості: підвищення міцності та зниження ваги конструкцій.
	- Автомобілебу-дування.	• Для автомобілебудування: оптимізація витрат на виробництво за рахунок довговічніших матеріалів.
	- Виробництво спортивного обладнання.	• Для виробництва спортивного обладнання: забезпечення вищої якості та надійності продукції.

Таким чином, запропонована технологія дозволить отримати значні конкурентні переваги на ринку авіаційних двигунів та енергетичних установок.

Виконаний аналіз характеристики потенційного ринку (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Головні конкуренти	Hexcel Corporation (США) Toray Industries (Японія) Owens Corning (США)
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стабільне зростання завдяки широкому застосуванню в авіації та автомобілебудуванні.
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Високі вимоги до технологічного обладнання та дослідницької бази.
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Стандарти ISO 527-4:1997 та ASTM D3039 для випробувань на розтяг; вимоги щодо екологічності та безпеки матеріалів.

Проведений аналіз ринку демонструє значний потенціал попиту на композитні матеріали у секторі виробництва авіаційних двигунів. Для успішного входження на цей ринок необхідно здійснити стратегічні інвестиції у виробниче обладнання та пройти процедуру сертифікації продукції, що забезпечить конкурентні переваги та відповідність галузевим стандартам.

За результатами маркетингового дослідження було здійснено сегментацію потенційних споживачів, визначено їх ключові характеристики та розроблено специфікації вимог до продукції для кожного сегменту ринку (табл. 5.3). Це дозволяє оптимізувати пропозицію відповідно до потреб кожної цільової групи клієнтів.

Таблиця 5.3 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів (користувачів)
Покращення характеристик продукції за рахунок використання міцних та легких матеріалів.	Виробники авіаційної та автомобільної техніки, компанії, що займаються виробництвом спортивного обладнання.	Авіаційні компанії зосереджені на максимальній безпеці та довговічності; автомобільні компанії шукають баланс між вагою і міцністю; виробники спортивного обладнання цінують естетику та функціональність.	Висока міцність, легкість, довговічність, екологічність матеріалів.

Для комплексної оцінки перспектив розвитку проекту з виробництва композитних матеріалів було проведено SWOT-аналіз (табл. 5.4). Цей метод стратегічного аналізу дозволив систематизувати ключові фактори внутрішнього та зовнішнього середовища, що впливають на успішність проекту.

В ході аналізу було визначено конкурентні переваги проекту, наявні ресурси та компетенції команди, а також виявлено потенційні обмеження та зони ризику. Особлива увага приділялася дослідженню ринкових можливостей та перспектив розвитку, включаючи потенційні напрямки розширення застосування технології.

Результати SWOT-аналізу створюють основу для розробки ефективної стратегії розвитку проекту, що враховує як сприятливі фактори, так і потенційні загрози зовнішнього середовища. Такий підхід дозволяє оптимізувати використання наявних ресурсів та мінімізувати можливі ризики при виході на ринок композитних матеріалів.

Таблиця 5.4 – SWOT- аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Висока міцність і легкість композитного матеріалу. Покращення енергоефективності та надійності виробів. Зниження вартості експлуатації та обслуговування продукції. Підвищення конкурентоспроможності продуктів на ринку. Можливість використання у різних галузях промисловості	Висока вартість первинних матеріалів. Складність у виробництві та обробці матеріалу. Потреба у високоспеціалізованих технологіях та обладнанні. Обмеженість у переробці та рециклінгу. Залежність від постачальників сировини.

Кінець таблиці 5.4

Можливості:	Загрози:
Розвиток нових ринків застосування (наприклад, у відновлювальній енергетиці). Співпраця з науково-дослідними інститутами для покращення характеристик. Розширення продуктової лінійки на базі композитних матеріалів. Зростання попиту на екологічно чисті технології. Використання урядових програм підтримки інновацій.	Зміни у законодавстві, що стосуються екологічних норм. Зростання конкуренції на ринку композитних матеріалів. Економічна нестабільність, що може впливати на інвестиційні потоки. Технологічне застарівання. Висока чутливість до коливань цін на сировину.

Проведений SWOT-аналіз забезпечив всебічне розуміння факторів впливу на розвиток проекту, що стало основою для розробки виваженої ринкової стратегії.

У процесі формування ринкової стратегії було реалізовано комплексний підхід до визначення цільової аудиторії, який включав наступні етапи:

1. Проведено сегментацію ринку з урахуванням специфічних характеристик потенційних споживачів композитних матеріалів та їх групування за ключовими ознаками.
2. Здійснено оцінку привабливості кожного ринкового сегменту на основі аналізу платоспроможності, потенціалу зростання та рівня конкурентної активності.
3. Визначено пріоритетні цільові сегменти з урахуванням виробничих можливостей та наявних ресурсів компанії.

4. Розроблено стратегію позиціонування (табл. 5.5), яка включає унікальну торгову пропозицію для кожного цільового сегменту та план комунікаційної взаємодії.

Такий методичний підхід до аналізу цільової аудиторії дозволив сформувати ефективну ринкову стратегію, що враховує специфіку кожного сегменту споживачів та оптимально використовує наявний потенціал компанії.

Таблиця 5.5 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Авіаційні компанії, що займаються виробництвом літаків. Виробники автомобільної промисловості, особливо спортивних авто. Компанії, які виготовляють спортивне обладнання та велосипеди.	Висока	Авіаційні компанії: 1500 одиниць на рік. Виробники автомобілів: 3000 одиниць на рік. Виробники спортивного обладнання: 2000 одиниць на рік.	Висока, особливо серед виробників автомобілів та авіаційної галузі.	Складна, потребує значних інвестицій в технології та дослідження.

Для забезпечення ефективного управління проектом з розробки композитних матеріалів було створено Карту стейкхолдерів, яка відображає всі ключові зацікавлені сторони та рівні їх взаємодії з проектом.

Структура Карти стейкхолдерів розподілена на три концентричні зони впливу:

1. Внутрішня зона (ядро) включає безпосередніх учасників проекту, що знаходяться під прямим управлінням ініціатора. Це забезпечує чітку координацію та контроль основних проектних процесів.
2. Середня зона охоплює партнерів, постачальників та ключових клієнтів, з якими встановлено обмежений рівень впливу. Взаємодія з цими стейкхолдерами базується на партнерських відносинах та взаємовигідній співпраці.
3. Зовнішня зона представляє стейкхолдерів з мінімальним рівнем прямого впливу - регуляторні органи, конкурентів та громадськість. Управління відносинами в цій зоні вимагає постійного моніторингу та адаптивного підходу.

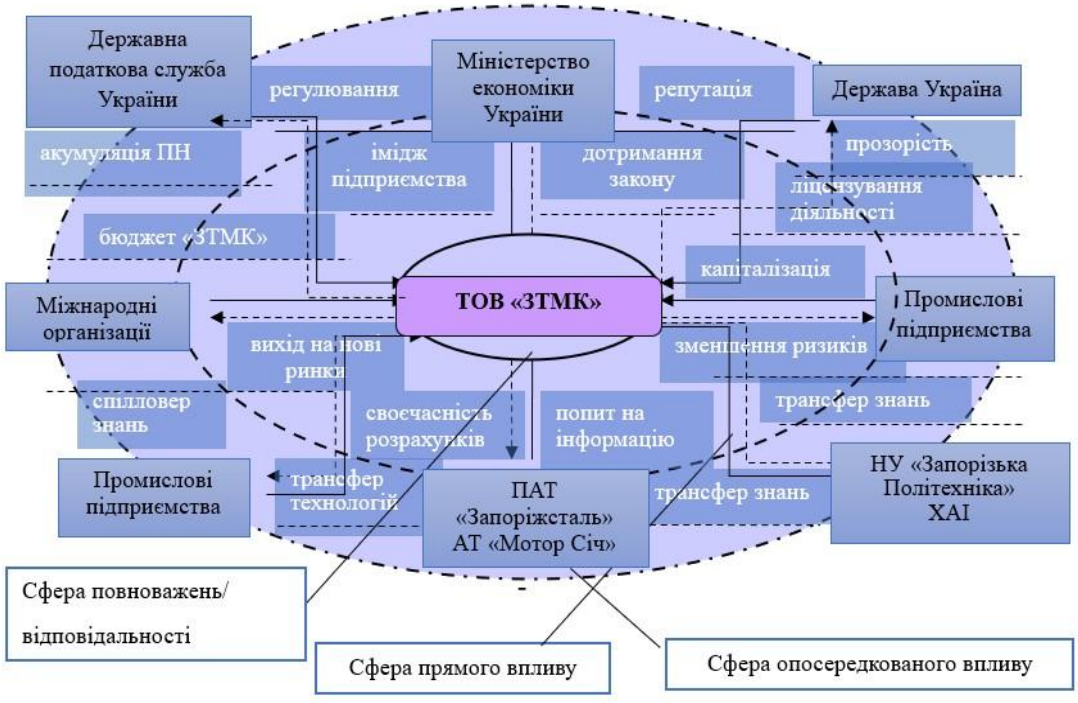


Рисунок 5.1 – Карта стейкхолдерів

Розроблена Карта стейкхолдерів є гнучким інструментом управління, який дозволяє оптимізувати комунікаційні стратегії та ефективно координувати взаємодію між усіма учасниками проекту, враховуючи динаміку змін проектного середовища.

Чіткий розподіл функціональних обов'язків та командна взаємодія були ключовими факторами успішної реалізації дослідницького проекту.

Науковий керівник зосередився на стратегічному керуванні дослідженнями, визначенні пріоритетних напрямків роботи та методологічній підтримці проекту. Його багаторічний досвід та експертні знання забезпечили правильну організацію дослідницького процесу.

Старший науковий співробітник виконував роль експертного куратора з контролю якості досліджень, гарантуючи дотримання всіх необхідних методик та стандартів. Він також брав активну участь у проведенні досліджень, застосовуючи свої професійні навички для отримання достовірних результатів.

Інженер-дослідник відповідав за весь комплекс експериментальних робіт. До його компетенції входило налаштування та обслуговування лабораторного обладнання, проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз отриманих даних. Його технічна експертиза була критично важливою для успішного виконання практичної частини проекту.

Лаборант забезпечував безперебійність дослідницького процесу через виконання необхідних підготовчих робіт, ведення документації та підтримку належного стану лабораторного обладнання. Його уважність та відповідальність у виконанні допоміжних функцій сприяли загальній ефективності досліджень.

Злагоджена робота всіх членів команди, заснована на чіткому розподілі обов'язків та професійному підході кожного учасника, забезпечила успішне досягнення цілей проекту та отримання надійних наукових результатів.

Таблиця 5.6 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати

Посада	Кількість осіб	Посадовий оклад, грн	Преміальний відсоток до окладу, %	Сума премій, грн	Місячна заробітна плата	Річний фонд оплати праці, грн	ЄСВ, грн
Науковий керівник	1	25000	20	5000	30000	360000	79200
Провідний інженер	1	19000	20	3800	22800	273600	60192
Інженер-технолог	2	15000	20	3000	18000	216000	47520
Лаборант	2	12000	20	2400	14400	345600	76032
Разом	6	71000	-	14200	85200	1195200	262944

Розрахунок вартості матеріалів. До цієї статті належать витрати на придбання основних матеріалів для проведення дослідження, а також для виготовлення макетів та дослідних зразків (табл. 5.7)

Таблиця 5.7 – Розрахунок матеріальних витрат

Матеріальні витрати	Виробнича програма	Обсяг сировини	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн
Канцелярські товари	-	-	-	2400
- Папір А4	–	5 пачок	160	800
- Ручки	–	25 шт	20	500
- Олівці	–	20 шт	15	300
- Папки-реєстратори	–	8 шт	100	800
Лабораторні матеріали	-	-	-	31100
- Зразки КМ	–	150 шт	95	14250

- Реактиви для травлення	–	15 л	950	14250
- Змінні лінзи для мікроскопа	–	2 шт	3500	7000
Допоміжні матеріали	-	-	-	2300
- Тара для зразків	–	20 шт	65	1300
- Захисні рукавички	–	200 пар	5	1000
Разом				35800

Розрахунок вартості послуг. До цієї статті належать витрати на електропостачання, водопостачання тощо (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Розрахунок вартості спожитих послуг

Вид послуг	Одиниця виміру	Кількість	Тариф, грн	Сума, грн
Електропостачання	кВт·год	400	4,85	1940
Водопостачання	$м^3$	20	32,5	650
Теплопостачання	Гкал	4	4200	16800
Охоронна сигналізація	місяць	1	3000	3000
Разом	-	-	-	22390

Визначили річну суму амортизації з урахуванням первісної вартості основних засобів та норми амортизації при терміні експлуатації у 5 років (табл. 5.9).

Таблиця 5.9 – Розрахунок амортизації

Обладнання	Кількість	Вартість, грн	Загальна вартість, грн	Річна амортизація (20%), грн	Поточний ремонт (2%), грн
МІМ-7	2	98 287	196574	27520,36	3931,48
Електронний мікроскоп	1	1357110	1357110	189995,4	27142,2
Піч вакуумна лабораторна	1	941240	941240	131773,6	18824,8
Комп'ютер	4	26547	106188	14866,32	2123,76
Принтер	1	14521	14521	2032,94	290,42
Разом	9	2437705	2615633	366188,62	52312,66

Враховано основне устаткування: вакуумна піч, твердоміри, мікроскоп та комп'ютери. Загальна річна сума амортизації з урахуванням ремонту складає 366188,62 грн.

Відображаємо кошторис витрат на основі даних, вказаних в табл. 5.6-5.9. В табл. 5.10 наведено кошторис витрат на проведення науково-дослідницьких робіт.

Таблиця 5.10 – Кошторис витрат

Стаття витрат	Сума, грн
1	2
Фонд заробітної плати	1195200
ЄСВ	262944
Матеріальні витрати	35800
Вартість послуг	22390

Кінець таблиці 5.10

1	2
Амортизація обладнання	366189
Поточний ремонт	52313
Виробнича собівартість	1934835
Адміністративні витрати (20%)	597600
Повна собівартість	2532435

Розрахунок економічного ефекту виконувався на основі того, що порівнювався економічний ефект від застосування склокомпозиту на основі епоксидної смоли для виготовлення труб порівняно з класичними трубами із чавуну.

Таблиця 5.11 – Собівартість одиниці продукції (труба довжиною 3м, діаметром 100мм)

Од. виміру	Чавунні труби СЧ30	Композитні труби SN5000
грн.	1760	4500

Собівартість розробленої композитної труби вища порівняно з класичною чавунною трубою, проте застосування композитних труб має достатньо переваг. Композитні труби мають значно меншу вагу, що становить лише 20-25% від ваги чавунних аналогів. Ця особливість суттєво спрощує процеси транспортування та монтажу, знижуючи потребу у важкій техніці та зменшуючи трудовитрати. На відміну від чавунних труб, які потребують регулярного захисту від корозії, композитні матеріали повністю стійкі до корозійних процесів, що виключає необхідність додаткової обробки та захисту.

Термін експлуатації композитних труб перевищує 50 років, тоді як чавунні труби зазвичай служать 20-30 років. Гладка внутрішня поверхня

композитних труб забезпечує кращі гідравлічні характеристики, що призводить до зменшення енергетичних витрат на перекачування рідин.

З економічної точки зору, використання композитних труб демонструє значні переваги в довгостроковій перспективі. Хоча початкові інвестиції у композитні труби вищі, загальна вартість володіння суттєво нижча завдяки мінімальним витратам на обслуговування, відсутності необхідності в антикорозійній обробці та довшому терміну експлуатації. Додаткова економія досягається за рахунок зменшення витрат на монтажні роботи та нижчого енергоспоживання при експлуатації.

Стабільність технічних характеристик протягом всього терміну служби та мінімальна потреба в ремонтах роблять композитні труби економічно доцільним вибором для сучасних інженерних систем, особливо при врахуванні довгострокової перспективи експлуатації.

ВИСНОВОК

На основі проведеного дослідження процесу формування композитного матеріалу з матрицею із епоксидної смоли та армувальних скляних волокон можна зробити наступні висновки.

Проведено комплексний аналіз сучасного стану розробок у галузі композитних матеріалів. Встановлено, що композити на основі епоксидних смол, армованих скляними волокнами, мають значний потенціал застосування завдяки оптимальному поєднанню механічних властивостей та економічної ефективності.

Досліджено особливості епоксидної смоли LH 289 як матричного матеріалу. Визначено, що даний тип смоли характеризується низькою в'язкістю, високою адгезією до армуючих волокон та оптимальним часом затвердіння, що забезпечує якісне просочення армуючого матеріалу та формування монолітної структури композиту.

Вивчено характеристики склоровінгу R25 H Tex 2400 як армуючого компоненту. Встановлено, що даний тип скловолокна забезпечує високі показники міцності та жорсткості композиту при збереженні технологічності процесу формування.

Розроблено та оптимізовано технологію формування композитного матеріалу методом намотування. Визначено оптимальні параметри процесу: швидкість намотування, натяг волокон, температурний режим затвердіння. Встановлено, що найкращі результати досягаються при спірально-перехресному намотуванні з кутом укладання ±45°.

Проведено економічний аналіз ефективності використання розробленого композитного матеріалу порівняно з традиційними матеріалами. Показано, що незважаючи на вищу початкову вартість, композитні вироби забезпечують значну економію за рахунок довшого терміну експлуатації,

відсутності потреби в антикорозійній обробці та нижчих експлуатаційних витрат.

Розроблено рекомендації щодо забезпечення безпечних умов праці при виробництві композитних матеріалів. Визначено основні фактори ризику та запропоновано комплекс заходів з охорони праці, що відповідають чинним нормативним вимогам.

Результати досліджень впроваджено у виробництво композитних труб, що підтвердило практичну цінність розробленої технології. Отримані вироби демонструють підвищену міцність, корозійну стійкість та довговічність порівняно з традиційними матеріалами.

Таким чином, проведене дослідження дозволило розробити ефективну технологію формування композитного матеріалу з оптимальними експлуатаційними характеристиками та економічними показниками, що має значні перспективи практичного застосування в різних галузях промисловості.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Композиционные материалы: справочник // под ред. Д.М.Карпиноса. К.: Наукова думка. - 1985. -592 с.

2. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці: підручник / [Є.О.Джур, Л.Д.Кучма, Т.А.Манько та ін.] - К.: Вища школа. - 2003.- 399 с.

3. Копань В.С. Композиційні матеріали. - К.: Унів. вид-во «Пульсари». - 2004. -201 с.

4. Koszkul J. Materiały Polimerowe. -Cręstochowa, 1999. -174 p.

5. Полімерні композити: одержання, властивості, застосування: [вибр. пр.] / О. І. Буря. — Дніпропетровськ: Федорченко А. А. -2010. - 383 с.

6. Тхір І.Г., Гуменецький Т.В.. Фізико-хімія полімерів: навч. посібник.– Львів : вид-во НУ «Львівська політехніка», 2005. 240 с.

7. Матеріалознавство: підручник / [Дяченко С.С. Дощечкіна І.В., А.О. Мовлян А.О. та ін.]– Харків: Видавництво ХНАДУ. - 2007. – 440 с.

8. Сушко О.В., Кюрчев С.В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: навч.посібник. – Мелітополь: ТОВ «Видавничий будинок ММД». - 2010. – 232 с.

9. Hollaway, L. Handbook of Polymer Composites for Engineers / L. Hollaway ed. – Cambridge : Woodhead Publishing, 1994. – 396 p.

10. Matthews, F. L. Composite Materials: Engineering and Science / F. L. Matthews, R. D. Rawlings. – Boca Raton : CRC Press, 1999. – 470 p.

11. Chawla, K. K. Composite Materials: Science and Engineering / K. K. Chawla. – 2nd ed., reprinted. – New York : Springer-Verlag, Inc., 1998. – P. 193.

12. Composite Materials Handbook (CMH-17) : в 6 т. / Composite Materials Handbook Committee. – Warrendale : SAE International, 2019.

13. ДСТУ 2093-92 Смоли епоксидно-діанові неотверджені. Технічні умови. [Введений у дію 01.01.1994]. – К.: НДІПМ, 1993. 16 с.

14. Peters, S. T. Handbook of Composites / S. T. Peters. – 2nd ed. – London : Chapman & Hall, 2018. – 1120 p.

15. Ferrigno, T. Principles of Filler Selection and Use. In Handbook of Fillers for Plastics, H. Katz and J. Milewski, ed.: Van Nostrand Reinhold Co. 1985, New York, pp 8-61.

16. Miracle, D. B. Glass Fibre Directory and Databook / D. B. Miracle, S. L. Donaldson. – Ohio : ASM International, 2017. – 456 p.

17. ДСТУ ГОСТ 19170-2003 Скловолокно. Тканина конструкційного призначення. Технічні умови. [Введений у дію 01.07.2003]. – К.: ДП «УкрНДНЦ », 2003. 26 с.

18. S.-Y. Fua,, B. Laukeb, E. Ma¨derb, C.-Y. Yuea, X. Hua, 2000. Tensile properties of short-glass-fiber- and shortcarbon-fiber-reinforced polypropylene composites Composites: Part A 31: 1117–1125

19. M. Lamm. The Fiberglass Story// Invention & Technology Spring, 2007, Vol. 22, Issue 4.

20. Strong, A. B. 2000. Polymer Composites. In Plastics: Materials and processing 2nd ed. prentice Hall. New Jersey. Pp 811.

21. ДСТУ EN 14020-1:2004. Склоровінг. Технічні умови / American Society for Testing and Materials. – [Чинний від 2004-07-01]. – К. : ASTM International, 2004. – 25 с.

22. Спорягін Е. О., Варлан К. Є. Теоретичні основи та технологія виробництва полімерних композиційних матеріалів: навч. посібник. – Донецьк: вид-во ДНУ, 2012. -188 с.

23. ДСТУ 2241-93. Матеріали композитні. Склопластики. Терміни та визначення. – [Чинний від 1994-01-01]. – К. : Держстандарт України, 1993. – 16 с.

24. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-7.11-12. – На заміну наказу МНС України від 26.12.2011 № 1350 ; чинний від 2012-03-16. – К. :

МНС України, 2012. – 116 с. – URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12. – (Нормативно-правовий акт охорони праці).

25. Про охорону праці [Електронний ресурс] – Чинний від 1992-10-14. : станом на 20.01.2018 р.–К.:ВРУкраїни,1998.– URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12. – (Закон України).

26. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом [Текст] : ДСТУ Б В.2.5-82:2016. – На заміну ДБН В.2.5-27-2006 ; чинний від 2017-04-01. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 109 с. – (Державний Стандарт України).

27. Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-1.71-13. – Чинний від 2014-03-28. – К. : Міненерговугілля України, 2013. – 59 с. – URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0327-14. – (Нормативно-правовий акт охорони праці).

28. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров’я працівників під час роботи з екранними пристроям [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-7.15-18. – На заміну НПАОП 0.00-1.28-10 ; чинний від 2018-05-18. – К. : Мінсоцполітики України, 2018. – Режим доступу: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508-18. – (Нормативно-правовий акт охорони праці).

29. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин [Електронний ресурс] : ДСанПіН 3.3.2.007-98. – Чинний від 1998-12-10. – К. : МОЗ України, 1998. – URL: http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=2445. –(Державні санітарні правила та норми).

30. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Електронний ресурс] : ДСН 3.3.6.042-99. – Чинний від 1999-12-01. – К. : МОЗ України, 1999. – URL: http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99. – (Державні санітарні норми).

31. Природне і штучне освітлення. [Текст] : ДБН В.2.5-28-2018. – На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний з 2019-03-01. – К. : Мінрегіон України, 2018. – 133 с. – (Державні будівельні норми України).

32. Правила пожежної безпеки в Україні [Текст] : НАПБ А.01.001-14. – На заміну НАПБ А.01.001-04 ; чинний від 2014-12-30. – К. : МВС України, 2014. – 47 с. – (Нормативний акт пожежної безпеки).

33. Протипожежний захист. Знаки безпеки. Форма та колір [Текст] : ДСТУ ISO 6309:2007. – На заміну ГОСТ 12.4.026-76 в частині пунктів 1.1, 1.2, 1.4, 1.6 таблиці 5, пунктів 2.1, 2.2 таблиці 6, пунктів 4.1-4.11 таблиці 8; знаків 1.1, 1.2, 1.4, 1.6, 2.1, 2.2, 4.1-4.11 додатка 3 ; чинний від 2007-10-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 9 с. – (Державний Стандарт України).

34. Планування і забудова територій [Текст] : ДБН Б.2.2-12:2018 – На заміну ДБН 360-92** ; ДБН Б.2.4-1-94 ; ДБН Б.2.4-3-95 ; ДБН Б.2.4-4-97 ; ДБН Б.1-2-95 ; СНиП II-89-80 ; чинний від 2018-09-01. – К. : Мінрегіон України, 2018. – 179 с. – (Державні будівельні норми).

35. Катренко Л. А. Охорона праці. Курс лекцій. Практикум [Текст] : навчальній посібник / Л. А. Катренко, Ю. В. Кіт, І. П. Піскун – 2-ге вид., стер. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2007. – 496 с.

ДОДАТОК А