

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут аерокосмічних технологій
Кафедра космічної інженерії**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри, к.т.н., доц.

_____ Олександр МАРИНОШЕНКО

" ____ " _____ 2023 р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Інженерія авіаційних та ракетно-
космічних систем»
спеціальності 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»
на тему: «Сферичний газовий балон
орбітальної станції і газопровідна арматура»**

Виконала:
студентка IV курсу, групи АК-91
Дудка Еліна Анатоліївна



Керівник:
професор, д.т.н.,
Архипов Олександр Геннадійович

Рецензент:
доцент, к.т.н.,
Ларьков Сергій Миколайович

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студентка 

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут аерокосмічних технологій
Кафедра космічної інженерії

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Спеціальність – 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»
Освітньо-професійна програма «Інженерія авіаційних та ракетно-космічних систем»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Олександр МАРІНОШЕНКО
«__» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту(-ці)

Дудці Еліні Анатоліївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту «Сферичний газовий балон орбітальної станції і газопровідна арматура», керівник проєкту Архипов Олександр Геннадійович професор, доктор технічних наук, затверджені наказом по університету від «__» _____ 2023 р. № _____
2. Термін подання студентом (-кою) проєкту 06 червня 2023 р.

3. Вихідні дані до проєкту: (Заповнюється відповідно до теми разом із керівником ДП)

3.1 Об'єм балону – 27 літрів

3.2. Тиск – 3 МПа

3.3. Середовище - азот

3.4. Матеріал конструкції - вуглепластик

4. Зміст пояснювальної записки:

4.1. Стан проблеми та методи вирішення

4.2. Огляд сучасних конструкційних матеріалів і методів розрахунку

4.3. Баки і балони орбітальних станцій і їх розрахункові моделі

4.4. Розрахунок сферичного балона на міцність

4.5. Технологія виготовлення паливних баків і посудин тиску

4.6. Технології виготовлення арматури трубопроводів

4.7.

5. Перелік графічного (ілюстраційного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо):

5.1 Постановка задачі і розрахункові моделі

5.2 Проектування балонів з композиційних матеріалів

5.3 Проектування елементів арматури

5.4 Неруйнівні методи контролю виробів з композиційних матеріалів

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1			
Розділ 2			

7. Дата видачі завдання: 1 лютого 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Підбір та аналіз літератури	до 01.03.2023 р.	
2.	Аналіз методів проектування посудин, що працюють під тиском	до 29.03.2023 р.	
3.	Аналіз методів неруйнівного контролю виробів з композиційних матеріалів	до 12.04.2023 р.	
4.	Розрахунок на міцність балона	до 20.04.2023 р.	
5.	Розробка технології виготовлення балона	до 30.04.2023 р.	
6.	Проектування арматури трубопроводів	до 10.05.2023 р.	
7.	Розрахунок балона на живучість	до 20.05.2023 р.	
8.	Неруйнівний контроль виробів з композиційних матеріалів	до 30.05.2023 р.	
9.	Оформлення пояснювальної записки та графічних матеріалів. Відгук керівника ДП	до 06.06.2023 р.	
10.	Перевірка на плагіат, рецензування	до 11.06.2023 р.	
11.	Захист	із 14.06.2023 р. по 20.06.2023 р.	

Студент (-ка)



Еліна Дудка

Керівник ДП

Олександр Архипов

П
о
л
е

д
л
я

п
і
д
ш
и
в
а
н

Анотація

Пояснювальна записка до ДП «Сферичний газовий балон орбітальної станції і газопровідна арматура» містить 87 сторінки тексту, 8 ілюстрацій та 17 бібліографічних посилань.

Мета проєкту – проєктування та розрахунок на міцність сферичного газового балону, виготовлено з композитного матеріалу, а саме вуглепластику.

В результаті виконано огляд сучасних композиційних матеріалів та їх перспективи в майбутньому, з урахуванням різних видів армуючих матеріалів та матриць.

Досліджено різноманітні типи посудин тиску та їх переваги, а також проаналізовані використання композитних матеріалів для таких посудин та переваги їх експлуатації.

Проведено проєктувальний розрахунок сферичного газового балона з композиційного матеріалу. Визначено напруження, які діють в конструкції. На основі проведених розрахунків визначено кількість шарів композиційного матеріалу та їх орієнтацію.

Запропоновано технологію намотування сферичної посудини тиску та методи контролю якості закінченого виробу.

В роботі використані сучасні методики розрахунку конструкцій з композитних матеріалів і методи комп'ютерного моделювання.

Результати роботи можуть бути використані при розробці проєктної документації до виготовлення сферичних газових балонів з композиційних матеріалів.

Ключові слова: вуглепластик, посудина тиску, епоксидні зв'язуючі, межа міцності, модуль пружності, неруйнівний контроль.

Abstract

Explanatory note to DP "Spherical gas pressure vessel and gas fittings of an orbital station" contains 87 pages of text, 8 illustrations and 17 bibliographic references.

The purpose of the thesis is the design and stress calculation of a spherical gas pressure vessel, made from composite material, namely carbon fiber.

As a result, an overview of modern composite materials and their prospects in the future has been conducted, taking into account various types of reinforcing materials and matrices.

Different types of pressure vessels and their advantages have been studied and the use of composite materials for such vessels, and their advantages have been analyzed.

The calculations for the spherical gas cylinder made from composite material have been performed as a part of this project to determine the stress loads of the structure. Based on those calculations, the appropriate number of layers of the composite material and their orientation have been defined.

Optimal technologies of winding a spherical pressure vessel and methods for performing quality control of the finished product have been proposed.

Modern methods of calculating stresses for structures made from composite material and computer modeling methods have been used in this work.

The results of this work can be used in the development of the project documentation for the production of spherical gas cylinders made from composite materials.

Key words: carbon fiber, pressure vessel, epoxy binders, strength limit, modulus of elasticity, nondestructive testing.

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту**

**на тему: «Сферичний газовий балон орбітальної станції і газопровідна
арматура»**

Зміст

Список термінів та умовних скорочень	9
Вступ	11
1. Огляд композитних матеріалів	13
Висновок до розділу 1.....	19
2. Огляд посудин тиску.....	21
2.1 Огляд посудин тиску із композитних матеріалів	27
Висновок до розділу 2.....	34
3. Обґрунтування вибору технології намотування сферичної посудини тиску	36
Висновок до розділу 3.....	40
4. Визначення напружено-деформованого стану для волокнистого композиційного матеріалу.....	41
4.1. Вихідні дані для проєктування волокнистого КМ.	43
4.2. Розрахунок експлуатаційних навантажень в шарах обшивки.	45
Висновок до розділу 4.....	51
5. Технологія виготовлення епоксидних зв'язуючих	52
Висновок до розділу 5.....	56
6. Технологія виготовлення сферичного газового балону	57
Висновок до розділу 6.....	59
7. Перевірка сферичного балону на герметичність.....	60
Висновок до розділу 7.....	64
8. Неруйнівний контроль виробів з композиційних матеріалів.....	65
8.1. Види та причини дефектів у виробках	68
8.2. Види та причини дефектів у виробках із композиційних матеріалів.....	72
8.3. Методи неруйнівного контролю композиційних матеріалів	75
Висновок до розділу 8.....	82
Висновок	84
Список використаних джерел	86

					AK9102.30.61.00.00ПЗ			
					Сферичний газовий балон орбітальної станції і газопровідна арматура	<i>Арк.</i>	<i>Маса</i>	<i>Масштаб</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		8		
<i>Розроб.</i>		<i>Дудка Е.А.</i>						
<i>Перевірив</i>		<i>Архипов О.Г.</i>						
<i>Т. Контр.</i>								
<i>Реценз.</i>		<i>Ларьков С.М.</i>				<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІ АК-91</i>		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>		<i>Архипов О.Г.</i>						

Список термінів та умовних скорочень

Автофретаж – це явище виникнення внутрішніх напружень у матеріалах чи конструкціях внаслідок їх взаємодії з зовнішніми навантаженнями та обмеженнями, що може призводити до пошкоджень або деформацій.

Адгезія – це фізичне явище притягання між поверхнями різних матеріалів, яке сприяє їх зчепленню та утворенню міцного контакту.

Армуючі елементи – це матеріали або структури, які використовуються для підвищення міцності, стійкості та жорсткості інженерних конструкцій.

Високомодульні волокна – це матеріали з високою жорсткістю та стійкістю, що використовуються для зміцнення та підвищення міцності композитних матеріалів.

ВПП – витік перед розривом.

Вуглепластик – це композитний матеріал, який складається з матриці на основі полімеру та армуючих волокон з вуглецевого волокна, який володіє високою міцністю, низькою вагою та високою стійкістю до корозії.

Експлуатаційне навантаження – це зовнішні фізичні чи механічні дії, яким піддається об'єкт під час його нормального функціонування, що включає сили, температурні коливання, вологість та інші фактори, які можуть впливати на його працездатність та тривалість служби.

Кевлар – це високоміцний армуючий матеріал, виготовлений з поліарамідних волокон, який має надзвичайно високу міцність, низьку вагу та високу стійкість до зношування.

КМ – композиційний матеріал.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

КОПВТ - композитні обмотуванні посудини під високим тиском

Матриця – це неперервна фаза або матеріал, що оточує армуючі елементи у композитних матеріалах, яка забезпечує підтримку, захист та передачу навантажень на арматуру.

МДРТ – максимально допустимий робочий тиск

МНК – метод неруйнівного контролю.

Моношар – це одношарова структура, що складається з армуючих волокон, які вкладені в матрицю, що утворює тонку стрічку з високою міцністю та жорсткістю.

УЗК – ультразвуковий контроль.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

В сучасних умовах розвитку космічної технології, питання забезпечення безпеки та ефективності роботи на орбіті є дуже актуальним. Сферичні газові балони є важливою складовою системи життєзабезпечення на борту орбітальної станції, а газопровідна арматура - необхідною для регулювання і перерозподілу газів в міжсистемних просторах.

Одним із основних викликів при розробці таких систем є забезпечення необхідної міцності та масово-габаритних характеристик при мінімальній вазі. В цьому контексті композитні матеріали, є дуже перспективними, оскільки мають декілька переваг перед однорідними матеріалами.

Композитні матеріали є складними технологічними продуктами, які містять два або більше компонентів з різними фізико-хімічними властивостями. Одна з головних переваг композитів полягає в тому, що вони мають значно вищі механічні властивості, такі як міцність та жорсткість, порівняно зі звичайними однорідними матеріалами. Висока міцність робить їх ідеальними для використання в конструкціях, які потребують високої стійкості та низької ваги, наприклад, в авіації, космічній техніці та автомобільній промисловості.

Окрім того, композитні матеріали можуть бути розроблені для конкретних застосувань, що дозволяє досягти високої ефективності та точності у виробництві. Крім того, вони мають великий потенціал для інноваційних дизайнів та функцій, які неможливо досягти з використанням інших матеріалів.

Використання композитних матеріалів в космічній техніці є дуже актуальним завданням, оскільки вони дозволяють створювати легкі, міцні та довговічні конструкції, які можуть працювати в складних

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

умовах космічного середовища. Композитні матеріали мають високу корозійну стійкість, що є особливо важливим у космічних умовах, де наявність атмосфери та інших зовнішніх факторів може призвести до швидкого руйнування звичайних металевих конструкцій.

Ще одною перевагою композитних матеріалів є їх здатність до термічної ізоляції. У космосі температури можуть коливатися від дуже низьких до дуже високих значень, і тому важливо мати матеріали, які можуть забезпечити ефективну ізоляцію від тепла та холоду. Композитні матеріали зазвичай мають низьку теплопровідність, що дозволяє їм зберігати стабільну температуру в межах широкого діапазону.

Ціллю роботи є проектування та аналіз сферичного газового балону з композитних матеріалів та газопровідної арматури для використання на орбітальній станції. Робота передбачає дослідження інженерних властивостей композитних матеріалів, проектування газового балону та газопровідної арматури та аналіз їх механічних та фізичних властивостей.

В даній роботі будуть використовуватись жорсткі полімерні поліетилентерефталатні (лавсанові) та поліімідні плівки, в якості герметизуючої оболонки. Силова оболонка буде виготовлена з вуглепластика методом намотування.

Таким чином, розробка сферичного газового балону та газопровідної арматури на основі вуглепластику є важливим науково-технічним завданням, що вирішує актуальну проблему забезпечення безпеки та ефективності роботи на орбіті.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Огляд композитних матеріалів

В останні роки у сфері авіаційної техніки та космічної промисловості стали широко використовуватися композитні матеріали. Це пов'язано з тим, що такі матеріали мають відмінні механічні та фізичні властивості, а також мають низьку вагу. Композити зазвичай складаються з матриці та наповнювача, які мають різну структуру та властивості.

Армуючі матеріали - це матеріали, які використовуються у композитних матеріалах з метою забезпечення їх міцності та стійкості до навантажень. У композитах, армуючі матеріали є основними складовими, які надають конструкції міцність та жорсткість, тоді як матриця забезпечує зв'язок між ними.

Найпоширенішими армуючими матеріалами в композитах є вуглецеві волокна, скловолокно та арамідні волокна. Вуглецеві волокна - це надзвичайно міцні та легкі волокна, виготовлені з вуглецевих ниток, які зміцнюються та зв'язуються між собою за допомогою спеціальних полімерів (рис 1.1).

Вуглецеві волокна мають дуже високу міцність на розтяг та модуль пружності, що забезпечує здатність матеріалу витримувати великі навантаження при мінімальній вазі. Вони також мають високу стійкість до зносу та корозії, що робить їх ідеальним матеріалом для виготовлення обтічників лопаток турбін, частин корпусу літаків, та інших елементів, що піддаються високим навантаженням.

Однак, вуглецеві волокна мають також деякі недоліки, такі як висока вартість та низька стійкість до ударів. Крім того, вони можуть бути тривало викладені ультрафіолетовому випромінюванню, що може спричинити деградацію матеріалу.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вони широко використовуються для корпусів літаків, двигунів та інших аерокосмічних застосувань.

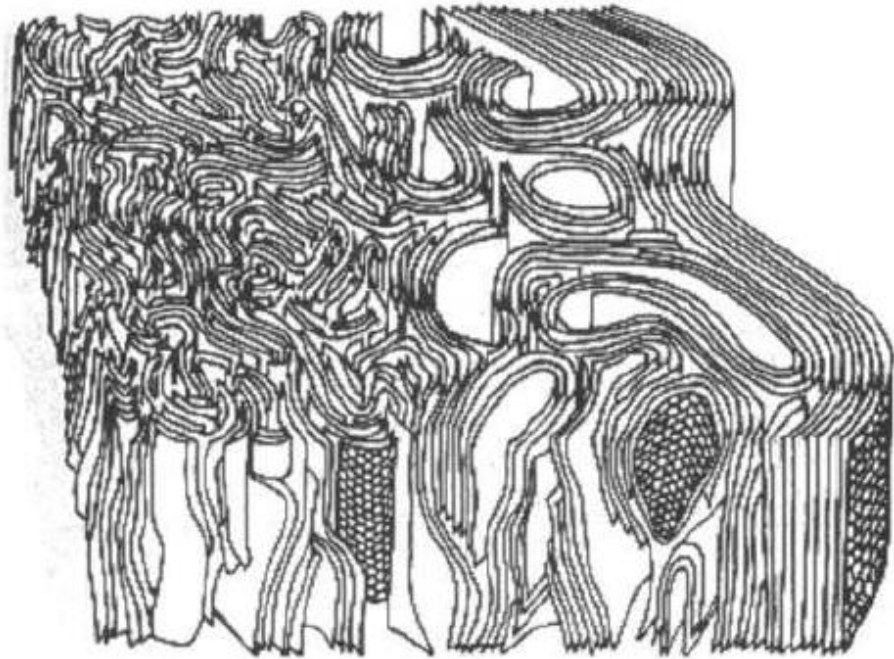


Рис. 1.1. Схематична ілюстрація структури вуглецевого волокна.

Скловолокно - це матеріал, який виготовляється з розплавленого скла, що тягнеться в нитки. Волокна скла забезпечують композитам високу міцність на розтяг, стійкість до ударних навантажень, вологостійкість, тепло- та вогнестійкість, а також високі термічні та електричні характеристики.

Висока міцність на розтяг досягається завдяки високій границі міцності матеріалу та питомій міцності скловолокна, яка є відношенням границі міцності до щільності матеріалу. Скловолокно використовується в композитах для виробництва різних конструкцій, включаючи літаки, автомобілі, судна і т.д.

Арамідні волокна - це штучні волокна, виготовлені з полімерів, які забезпечують високу міцність та стійкість до зношування. Вони виготовляються з полімерних матеріалів, таких як поліпарафілентерефталамід (ППТА), який відрізняється високою міцністю, стійкістю до зносу, термічної та хімічної стійкості.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Арамідні волокна мають високу міцність на розтяг та модуль пружності, які забезпечують здатність матеріалу витримувати великі навантаження. Вони також відрізняються високою стійкістю до зносу та абразії, що робить їх ідеальним матеріалом для виготовлення захисних елементів. Крім того, арамідні волокна мають високу термічну та хімічну стійкість, яка дозволяє їм зберігати свої властивості при високих температурах та в агресивних середовищах.

Вони використовуються в композитах для виробництва захисних конструкцій, таких як бронежилети та шоломи.

Окрім вуглецевих волокон, скловолокна та арамідних волокон, існують також інші матеріали, які можуть бути використані як армуючі в композитах. До цих матеріалів відносяться, наприклад, метали, кераміка, бор, титан та багато інших.

Метали, зокрема алюміній та титан, можуть бути використані як армуючі матеріали у композитах. У такому випадку, металічні волокна вкладаються в матрицю, що дозволяє отримати матеріал з високою міцністю та стійкістю до навантажень. Керамічні матеріали, такі як оксид алюмінію та карбід кремнію, забезпечують композитам високу міцність та стійкість до високих температур.

Бор - це легкий та міцний матеріал, який має надзвичайно високу міцність та жорсткість, а також високу стійкість до корозії. Крім того, бор має високу стійкість до високих температур, що дозволяє використовувати його у виробництві композитів для високотемпературних застосувань.

Титан може бути використаний у виробництві композитів для авіаційної та космічної промисловості, а також у виробництві автомобільних деталей.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір армуючого матеріалу залежить від конкретних вимог до матеріалу, таких як міцність, жорсткість, стійкість до корозії, стійкість до високих температур, легкість та інші параметри.

Матриці відіграють важливу роль у визначенні кінцевих властивостей композитних матеріалів. Головні функції матриці полягають у тому, щоб переносити навантаження від волокон та до них, розділяти волокна для запобігання пошкодженню сусідніх волокон при пошкодженні іншого з них, захищати волокна від шкідливого впливу навколишнього середовища та підтримувати їх у формі компонента. Механічні властивості композиту, які значно залежать від властивостей полімерної матриці (та міцності зв'язку між волокном та матрицею), включають довговічність при стиску в напрямку волокон, розтягну міцність в поперечному напрямку та зчеплення міжшарових шарів між волокнами. Ці властивості зазвичай називаються властивостями, що залежать від матриці.

Існує декілька видів матриць. Матриці з полімерних матеріалів є одним з найбільш поширених типів матриць для композитних матеріалів, особливо для високотехнологічних застосувань у літакобудуванні та автомобільній промисловості. Полімерні матриці зазвичай мають низьку густину, що забезпечує легкість та маневреність композитних матеріалів, а також мають високу міцність та еластичність, що забезпечує хороші механічні властивості композиту.

Однак, є деякі обмеження використання полімерних матриць, зокрема щодо їхньої термостійкості та стійкості до хімічних розчинників. Полімерні матриці зазвичай не можуть витримувати дуже високі температури або контакт з деякими агресивними рідинами та розчинниками, які використовуються в промислових умовах. Однак, деякі полімерні матриці були розроблені для використання в екстремальних умовах, зокрема за допомогою модифікації структури

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

полімеру або додавання спеціальних добавок, що підвищують їхню термостійкість та стійкість до хімічних розчинників.

Матриці з полімерних матеріалів можуть бути виготовлені за допомогою різних технологій, таких як лиття, вприскування та інфузія. Вибір технології виготовлення матриці залежить від властивостей матеріалу, типу волокон, застосування та багатьох інших факторів.

Матриці з керамічних матеріалів використовуються в композитних матеріалах для підвищення міцності, жорсткості, термостійкості та зносостійкості. Кераміка є дуже жорстким та міцним матеріалом, що робить її привабливою для використання в матрицях композитних матеріалів.

Однак, керамічні матриці мають певні недоліки. Вони можуть бути дуже крихкими, тому їх використовують переважно для виготовлення композитних матеріалів, які не піддаються значному напруженню. Крім того, вони можуть бути більш складними для виготовлення, оскільки керамічні матеріали потребують високих температур для синтезу та обробки.

Керамічні матриці застосовуються в різних областях, таких як авіаційна та космічна промисловість, енергетика, медицина та електроніка. Наприклад, керамічні матриці використовуються для виготовлення композитних матеріалів для газотурбінних двигунів, теплообмінників та інших складних пристроїв, де важливі міцність, термостійкість та зносостійкість.

Матриці з металевих матеріалів використовуються у виробництві композитів для досягнення високої міцності та жорсткості. Найчастіше використовується алюміній, магній, титан, сталь та їхні сплави як матричні матеріали.

Металеві матриці мають високу термічну та механічну міцність, тому їх використовують у вимогливих умовах, де потрібна стійкість до

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тиску та температурних змін. Однак, металеві матриці мають низьку корозійну стійкість та важку вагу порівняно з полімерними матрицями.

Методи виробництва металевих матриць включають плавлення та лиття в форму. Також можуть використовуватись технології, такі як електронний зварювання та спайкування, для виготовлення металевих матриць з високою точністю та складністю форми.

Композити з металевими матрицями використовуються в авіаційній, космічній, автомобільній та військовій промисловості, де вимагається висока міцність та жорсткість при екстремальних умовах експлуатації.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок до розділу 1

Композитні матеріали мають великий потенціал у різних галузях, але особливо в аерокосмічній сфері, де вони використовуються для створення легких, але міцних і довговічних компонентів. Використання композитів у аерокосмічній сфері дозволяє зменшити вагу літака або космічного апарата і, як наслідок, знизити споживання палива, що знижує витрати на експлуатацію.

У композитних матеріалах основну роль відіграють волокна і матриця. Волокна можуть бути виготовлені з різних матеріалів, включаючи скло, вуглецеве волокно і арамідні волокна, тоді як матриця може бути з полімерів, кераміки або металів.

Щоб отримати композит з бажаними властивостями, важливо добре зрозуміти механічні властивості волокон і матриці, а також взаємодію між ними. Особливу увагу слід приділяти інтерфейсному шару, який визначає міцність зв'язку між волокнами і матрицею.

Однією з основних переваг композитних матеріалів є їх спроможність демонструвати збалансовані механічні властивості, включаючи високу міцність, жорсткість і довговічність. Крім того, композитні матеріали можуть бути виготовлені за допомогою різних методів, що дозволяє налаштувати їх властивості відповідно до конкретних потреб застосування.

Хоча композитні матеріали мають багато переваг, вони також мають деякі недоліки. Наприклад, складність виготовлення та високі витрати на виробництво можуть зробити композити менш конкурентоспроможними порівняно з традиційними матеріалами. Крім того, їх використання може бути обмеженим у високотемпературних середовищах, де матриця може розплавитись або розкладатись.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак, з розвитком технологій виробництва композитних матеріалів та постійним вдосконаленням їх властивостей, їх використання стає все більш розповсюдженим у різних галузях промисловості та техніки. Композитні матеріали допомагають зменшити вагу конструкцій, підвищити міцність та стійкість до корозії, збільшити термін служби та знизити витрати на експлуатацію.

Таким чином, композитні матеріали стають все більш популярними та важливими у сучасному світі, сприяючи досягненню більш стійких, міцних та легких конструкцій, які задовольняють вимоги сучасної промисловості та техніки.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Огляд посудин тиску

Посудини тиску є невід'ємною частиною конструкцій літальних апаратів, включаючи космічні апарати, ракети та літаки. Ці посудини використовуються для зберігання різних робочих тіл, таких як повітря, азот, гелій, водень і інші гази, під високим тиском. Вони дозволяють зберігати ці робочі тіла в безпечних умовах і використовувати їх для різних цілей, включаючи рух і підтримку життєдіяльності команди космічних місій.

Посудини під тиском широко використовуються в аерокосмічній промисловості для різних застосувань. Одним із основних застосувань посудин під тиском в аерокосмічній промисловості є зберігання та транспортування газів і рідин під високим тиском. Ось деякі конкретні застосування посудин під тиском в аерокосмічній промисловості:

Паливні баки: резервуари під тиском використовуються як паливні баки в ракетах і космічних кораблях для зберігання та транспортування рідких паливних речовин, таких як рідкий кисень і рідкий водень. Ці резервуари повинні бути розроблені таким чином, щоб витримувати екстремальні температури та тиск.

Гідравлічні системи: резервуари під тиском використовуються в гідравлічних системах літаків для зберігання гідравлічних рідин під тиском. Ці рідини використовуються для живлення поверхонь управління польотом, шасі та інших систем. Посудини під тиском, які використовуються в гідравлічних системах, зазвичай виготовляються зі сталі або титану.

Зберігання повітря: посудини під тиском також використовуються для зберігання стисненого повітря в літаках, зокрема в пневматичних системах. Це повітря використовується для різних цілей, включаючи

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

запуск двигунів, накачування шин і роботу систем з повітряним приводом.

Системи контролю навколишнього середовища: резервуари під тиском використовуються в системах контролю навколишнього середовища в літаках для зберігання та транспортування холодоагентів, таких як фреон. Ці посудини повинні бути розроблені таким чином, щоб витримувати високий тиск і температури.

Системи життєзабезпечення. Посудини під тиском використовуються в системах життєзабезпечення космічних кораблів для зберігання та транспортування придатних для дихання газів, таких як кисень і азот. Ці судна повинні бути сконструйовані таким чином, щоб забезпечити безпеку та благополуччя екіпажу під час довготривалих місій.

На додаток до вищезазначених застосувань, посудини під тиском також використовуються в різноманітному наземному допоміжному обладнанні для аерокосмічної промисловості, наприклад, у випробувальних установках, аеродинамічних трубах і наземному транспортному обладнанні. Проектування та виготовлення посудин під тиском, які використовуються в аерокосмічній промисловості, регулюються суворими правилами та стандартами для забезпечення безпеки та надійності.

Типи посудин тиску можна розрізнити за формою. Циліндричні посудини тиску є одними з найпоширеніших типів посудин тиску. Ці ємності використовуються для зберігання та транспортування газів і рідин під тиском у різних галузях промисловості, таких як нафтогазова, хімічна та промислова.

Циліндричні посудини тиску зазвичай виготовляються зі сталі або інших високоміцних сплавів, які витримують високий тиск і температури. Посудина складається з циліндричної оболонки, двох

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

торцевих кришок і сопла або фланця для з'єднання з іншими компонентами. Кінцеві кришки зазвичай напівсферичні або тарілчасті, що сприяє рівномірному розподілу напруги по посудині.

Конструкція циліндричного резервуара під тиском залежить від кількох факторів, включаючи максимально допустимий робочий тиск (МДРТ), робочу температуру та властивості матеріалу. МДРТ – це максимальний тиск, який може безпечно витримати посудина під час нормальної роботи. Робоча температура також є важливим фактором, оскільки високі температури можуть спричинити розширення або звуження посудини, що призведе до деформації або поломки.

Товщина циліндричної оболонки розраховується виходячи з МДРТ, діаметра посудини та властивостей матеріалу. Товщина повинна бути достатньою, щоб витримати максимальне навантаження і запобігти розриву судини. Товщина також допомагає рівномірно розподілити навантаження по всій посудині.

Циліндричні резервуари під тиском можуть бути горизонтальними або вертикальними, залежно від застосування. Горизонтальні посудини часто використовують для зберігання рідин, а вертикальні — для зберігання газів. Орієнтація посудини також впливає на конструкцію, оскільки вона визначає розподіл напруги по всій посудині.

Окрім конструкційних міркувань, циліндричні посудини тиску також необхідно регулярно перевіряти та обслуговувати, щоб забезпечити їх безпечну роботу. Методи неруйнівного контролю, такі як ультразвуковий контроль і рентгенографія, використовуються для виявлення будь-яких дефектів або дефектів посудини. Посудину також необхідно періодично перевіряти на наявність корозії та інших ознак пошкодження.

Підсумовуючи, циліндричні посудини тиску є поширеним і важливим компонентом у багатьох галузях промисловості. Їхню

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конструкцію та конструкцію необхідно ретельно продумати, щоб забезпечити безпечну роботу під високим тиском і температурами. Регулярний огляд і технічне обслуговування також необхідні для забезпечення безперервної безпечної експлуатації цих посудин.

Сферичні посудини тиску - це тип посудин тиску, які мають сферичну форму, яка розроблена, щоб витримувати високий внутрішній тиск. Ці посудини зазвичай використовуються в таких сферах, як зберігання стиснених газів і рідин, а також у хімічній і нафтохімічній промисловості.

Однією з переваг сферичних посудин тиску є їх здатність витримувати внутрішній тиск ефективніше, ніж циліндричні посудини тиску. Сферична форма більш рівномірно розподіляє тиск по площі поверхні, що знижує концентрацію напруги та підвищує міцність посудини. Сферичні посудини тиску також мають нижче співвідношення площі поверхні до об'єму, ніж циліндричні посудини, що може бути корисним у певних випадках, коли важлива теплопередача або ізоляція.

Сферичні посудини тиску можуть бути виготовлені з різних матеріалів, включаючи сталь, алюміній і композитні матеріали. Конструкція цих посудин враховує властивості матеріалу, цільове використання та умови експлуатації, такі як температура, тиск і фактори навколишнього середовища.

Подібно до циліндричних посудин тиску, конструкція сферичних посудин тиску також передбачає розрахунок необхідної товщини стінки, щоб витримати внутрішній тиск. Однак, оскільки посудина сферична, розрахунки є більш складними та передбачають визначення напружень у всіх трьох вимірах. Сферичні посудини тиску також можуть потребувати додаткових конструктивних міркувань, таких як опори та з'єднання, необхідні для кріплення посудини на місці.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сферичні посудини тиску також підлягають нормативним вимогам, які включають випробування та перевірку для забезпечення їх безпечної експлуатації. Ці вимоги можуть включати неруйнівний контроль, такий як радіографічний та ультразвуковий контроль, для виявлення будь-яких дефектів або пошкоджень, які можуть поставити під загрозу цілісність посудини.

Балони високого тиску є типовими вузлами пневмогідролічної системи двигунів ракет і космічних апаратів. Посудини тиску, які використовуються в літальних апаратах, можуть мати різні форми та розміри, залежно від їх призначення і функцій. Серед найпоширеніших форм можна виділити форму сфери або циліндра з днищами, тором, а іноді - форму кількох сполучених між собою сфер (така форма зменшує масу конструкції за рахунок скорочення кількості штуцерів та вузлів кріплення).

Об'єм застосовуваних балонів коливається від одиниць до сотень літрів, а тиск заповнення - від 20 до 30 МПа.

Для скорочення числа пневмогідролічних систем та зменшення їх маси балони часто розміщують всередині бака з криогенним компонентом. Конструкційними матеріалами для балонів є високоміцні сталі, титанові сплави та композиційні матеріали (КМ).

В космічних системах посудини високого тиску мають широке застосування як у двигунних установках різного призначення, так і в системах подачі палива. При балонній подачі стислий газ із посудин тиску через редуктор стравлюється в паливні баки.

В космічних системах балони високого тиску знаходять широке застосування у різних типах двигунів та системах подачі палива. Вони допомагають заміщувати атмосферне повітря, компоненти палива, продукти згоряння або газогенерацію в внутрішніх порожнинах двигуна

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та системах паливної установки за допомогою нейтрального або спеціального газу.

В системах барботування компонентів палива стислий газ, що знаходиться в посудинах тиску, проходить через шар палива, забезпечуючи перемішування рідини та вирівнювання її температури по всій товщині шару.

Балони високого тиску є обов'язковими компонентами допоміжних пневмогідравлічних систем, які дозволяють забезпечувати безперебійне функціонування космічних апаратів у визначених умовах експлуатації.

Ці балони є складовою частиною системи управління тиском, яка забезпечує енергією стислого газу всі пневмогідравлічні системи автоматизації двигунної установки космічного апарата. Вони також використовуються в системах вентиляції та створення інертного середовища, що запобігають виникненню небезпечних концентрацій парів палива під час польоту. Ця система створення інертного середовища передбачає використання запасу стислого газу, який зберігається в балонах на борту космічного апарату і витрачається протягом усього польоту.

Крім того, посудини високого тиску включені до системи, що забезпечує підтримку надлишкового тиску у баках (для збільшення їх жорсткості у випадках, коли стінка бака має малу товщину). Вони також входять до систем живлення автономних агрегатів стислим газом, роз'єднання великогабаритних пневмогідравлічних з'єднань блоків ЛА та надуву амортизаторів космічних апаратів.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.1 Огляд посудин тиску із композитних матеріалів

Композитні обмотуванні посудини під високим тиском (КОПВТ) використовуються в NASA для утримання рідин під високим тиском у двигунах, наукових експериментах і програмах для забезпечення життєдіяльності. Ці КОПВТ мають перевагу у вазі перед суцільнометалевими посудинами, але вимагають унікальних вимог до дизайну, виробництва та випробувань порівняно з суцільнометалевими посудинами. Найбільш суттєвою відмінністю від металевих конструкцій є те, що КОПВТ потребують глибшого розуміння механіки через взаємодію між композитним обмотуванням і внутрішнім шаром.

Зазвичай металевий шар використовується в КОПВТ як бар'єр для рідинної проникності. Концепції та вимоги до дизайну металевого шару були запозичені з металевих посудин. Однак застосування стандартів дизайну металевих посудин до дуже тонкого шару, особливо композиту, не є простим. Для КОПВТ існують різні режими відмов, які відрізняються від металевих посудин, а розуміння цих режимів на значно більш примітивному рівні, ніж у металевих посудинах. Існують три значні відмінності між композитними та металевими посудинами:

Незважаючи на те, що композитні матеріали з вуглецю, кевлару та скла можуть втратити свою міцність під дією зовнішнього впливу на поверхню, відомо, що кевлар та скло мають більшу стійкість до пошкоджень порівняно з вуглецевими композитами. Дослідження показали, що металеві та кевларові обмотані посудини не втрачають значну частину своєї структурної міцності навіть при незначних пошкодженнях поверхні.

Одним з найважливіших факторів, які слід враховувати при розробці композитних матеріалів, є ефект статичної втоми або стресової тріщини, що може спричинити відмову композиту під час роботи під

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

високим тиском. Однак, правильною інженерною практикою під час проектування та тестування можна значно зменшити ризик відмови матеріалу.

Крім того, важливо враховувати, що кількісні методи неруйнівного контролю, які ефективно застосовуються для виявлення дефектів у товстостінних металевих конструкціях, можуть бути не ефективними при застосуванні до дизайну КОПВТ. Отже, необхідно використовувати спеціальні методи контролю для виявлення можливих дефектів у таких композитних матеріалах.

Як і металеві посудини, так і КОПВТ мають унікальні переваги. Для того, щоб ефективно розробляти конструкцію металевих посудин і посудин із композитних матеріалів, необхідно враховувати їх потребу в продуктивності та використанні. Залежно від застосування, конструкція може бути розроблена з урахуванням високої міцності під тиском розриву для промислових та комерційних застосувань або високої ефективності (ефективність – це відношення ємності виробу до ваги посудини) для застосування на ракетах та космічних апаратах. Для легких, високоефективних застосувань, КОПВТ запропонує значну перевагу ваги, приблизно половину ваги порівнянного металевого бака.

Суцільнометалева посудина, можливо, важча, але зазвичай пропонує переваги нижчої вартості виробництва, перевірки контролю руйнування шляхом аналізу та просто більш простої конструкції.

Демонстрація вимог щодо контролю руйнування для КОПВТ, таких як безпечний термін служби та/або витік перед розривом (ВІР) тонкого металевого шару та стійкість до пошкоджень композитної зовнішньої оболонки, зазвичай перевіряється дорогими кваліфікаційними випробуваннями. Загальноприйняті методи неруйнівного контролю (НК) використовуються для товстих металевих конструкцій, які використовуються для кількісного визначення критичного розміру

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дефекту, який перевіряється під час приймальних випробувань. Неруйнівний контроль використовується в аналізі безпечного життєвого циклу та ВПР як відправна точка для прогнозування терміну служби або відмови посудини.

Методи НК не були кількісно продемонстровані для тонких металевих шарів або композитних матеріалів. Робота в цій галузі триває, і на момент написання дипломної роботи було досягнуто значного прогресу в композитній технології НК. Контрольне випробування є чудовим інструментом скринінгу виробничих аномалій, але може не ефективно перевірити посудину, чутливу до втомних тріщин у шарі або передчасного руйнування композиту від напруги.

Високоєфективні КОПВТ були дуже ефективно та безпечно використані в одноразових безпілотних ракетах для космічних застосувань. Проте, під час проектування посудин тиску важливо враховувати їх масу, продуктивність, вартість та ризики для кожного конкретного застосування.

Конструкція КОПВТ вимагає аналізу шара, зовнішньої оболонки волокна та взаємодії між ними. Шари КОПВТ можуть бути з пластичних матеріалів, таких як м'який алюміній, з мінімальними можливостями розподілу навантаження. В якості альтернативи можна використовувати високоміцну сталь, титан або криогенно сформовану нержавіючу сталь, що призведе до розподілу навантаження. В останніх проєктах почали використовувати КОПВТ з пластиковим покриттям, щоб мінімізувати вагу. Волокно зазвичай наноситься у вигляді стрічки з кількох волокон, яка проходить через ванну для нанесення смоли. Ця стрічка з волокна та смоли намотана на шар, як намотується як клубок мотузок. Шар резервуара під тиском і розподільна головка для стрічки з волокнами переміщуються відносно один одного таким чином, щоб обернути волокно на шар у бажаний малюнок. Якщо посудина має циліндричну, а

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

не сферичну форму, намотування волокна зазвичай виконується як поздовжнім (спіралевидним), так і окружним (обручем).

Цей процес намотування складається з кількох критичних етапів, таких як вміст смоли, конфігурація волокон, натяг намотування та малюнок обгортки відносно осі шара. Потім смолі дають затвердіти (висихати та затвердіти) при високій температурі.

Після перевірок та затвердіння посудину можна підібрати за розміром або виконати автофретаж для покращення структурних характеристик.

Автофретаж — це процес, за допомогою якого КОПВТ створює тиск вище межі текучості п'ятого шара, що призводить до пластичної деформації або розширення шара. Тепер шар постійно розширюється, так що під час зниження тиску в волокнистому композиті залишається деформація розтягу (або напруга) через збільшений шар, а у шарі виникає деформація стиску. Вимірювання розширення у внутрішньому об'ємі бажано для кількісної оцінки величини залишкової деформації як у шарі, так і в обгортці. Залишкова деформація стиснення у шарі призводить до покращеного терміну служби шара. Визначення розміру (або автофретаж) загорнутого шара може служити випробуванням на випробування, або може бути виконано друге випробування (за нижчого тиску).

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

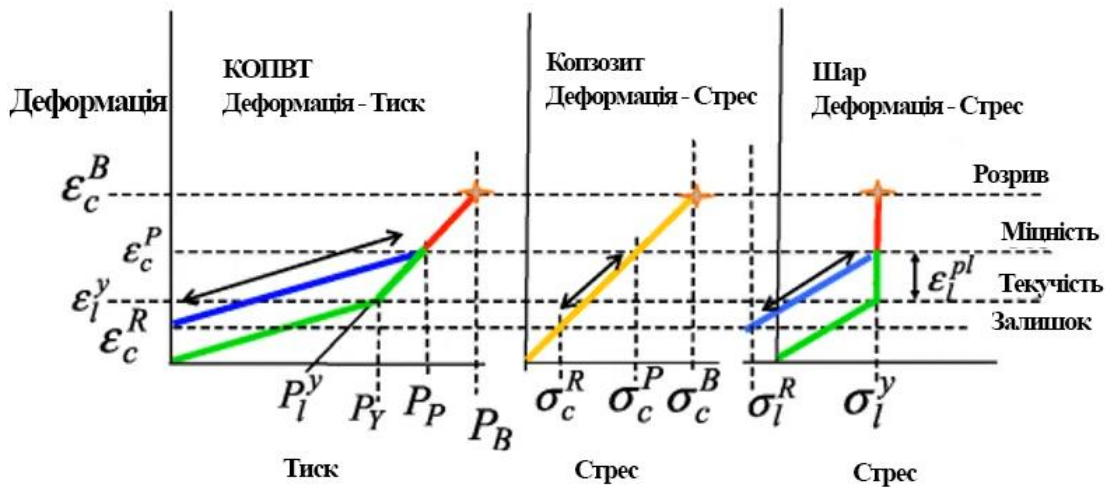


Рис. 2.1.1. Деформація при автофретажі

Можна виділити декілька рекомендації щодо розробки КОПВТ

Для того, щоб забезпечити відповідність передбачуваному застосуванню КОПВТ, необхідно враховувати кілька ключових факторів, таких як тривалість терміну служби та вплив навколишнього середовища. Крім того, КОПВТ, що піддаються декільком циклам тиску, потребують більш високих запасів надійності, таких як використання більш високих коефіцієнтів безпеки та зменшення негативного впливу зовнішнього середовища, ніж ті, які використовуються у військових застосуваннях або для одноразового використання в орбітальних космічних польотах.

Необхідно визнати, що КОПВТ мають відмінні від металевих посудин характеристики та потребують встановлення унікальних стандартів.

Для забезпечення якості та продуктивності КОПВТ необхідний контроль якості матеріалів та виробництва, врахування вимог до запасу міцності, терміну корисного використання та екологічних обмежень, які значно відрізняються від тих, що застосовуються до металевих посудин. У зв'язку з цим, необхідно враховувати унікальні режими відмови, які

						Аркуш
					AK9102.30.61.00.00ПЗ	31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

характерні для КОПВТ, такі як композитні режими руйнування, які включають розрив під напругою та ударне пошкодження.

Для покращення надійності конкретних композитних систем, рекомендується розробити велику базу даних. Загальні характеристики скляних і кевларових волокон та субшкала КОПВТ були задокументовані, але клас волокон, які називають вуглецевими (або, можливо, графітовими), були задокументовані не настільки добре.

Характеристики вуглецевого волокна, що стосуються консистенції сировини, виробничих процесів, факторів старіння, кінцевої міцності та непередбачуваності розриву від напруги, а також інших важливих факторів, що забезпечують довгострокову надійність, мають бути добре зрозумілими. Це потрібно, щоб характеристики матеріалу оцінювалися в таких конфігураціях, як окремі волокна, композитні нитки (лінійний структурний елемент із волокна та смоли), тестові кільця, субшкальні КОПВТ та, в ідеалі, повнорозмірні посудини кожної конфігурації.

У погіршенні продуктивності оптоволокна присутній часовий елемент, і повнорозмірна конфігурація КОПВТ може включати локалізовані області більшого навантаження, чутливі до впливу часу під тиском і умов навколишнього середовища. Співвідношення продуктивності від субшкали до повномасштабного тестування іноді може бути не надійним; тому існує потреба в оцінці за допомогою обширних композитних інструментів/методів перевірки та можливого прискореного (з використання підвищеної температури/тиску) випробування на розрив під напругою.

Варто спростити процес тестування матеріалів, використовуючи обмежену комбінацію волокон та смоли для всіх типів посудин в рамках певної програми. Хоча можуть залишатися деякі відмінності в продуктивності композиту через розмір, товщину та розподіл

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навантаження, але краще мати велику базу даних для конкретної комбінації волокна та смоли.

Для конкретної програми необхідно обрати між суцільнометалевими посудинами та КОПВТ. Вибір залежить від конкретної ситуації, оскільки суцільнометалеві посудини можуть мати переваги у деяких випадках, тоді як КОПВТ можуть бути кращим в інших. Використання КОПВТ потребує додаткової складності, пов'язаної з обробкою композитів та управлінням їх відмовою, порівняно з металевими посудинами. Однак, з належним проектуванням та тестуванням, ймовірність катастрофічної відмови КОПВТ, що може призвести до втрат власності та життів, може бути знижена до прийнятних рівнів.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок до розділу 2

Отже, посудини тиску використовуються в різних галузях, таких як хімічна та нафтова промисловість, медицина, а також у космічній сфері. В космічній сфері посудини тиску є надзвичайно важливим компонентом, оскільки вони забезпечують життєзабезпечення екіпажу та безпеку місії. Крім того, з'являється все більше посудин тиску, виготовлених з композитних матеріалів, які мають переваги перед звичайними металевими посудинами тиску.

Посудини тиску з композитних матеріалів мають відмінні характеристики, такі як висока міцність при низькій масі, стійкість до корозії, здатність до формування в складні форми та висока стійкість до втоми матеріалу. Посудини тиску з композитів можуть бути використані у більш широкому діапазоні температур та середовищ, а також забезпечують більш ефективний захист від ударів та вибухів.

У загальному, посудини тиску є надійними засобами зберігання газів під тиском, і КОПТВ стають все більш популярними в комерційних, авіаційних, космічних та транспортних додатках. Розвиток технології КОПТВ продовжується, дозволяючи отримувати більше інформації щодо матеріалів та процесу проектування, що допомагає забезпечувати ще більшу надійність цих посудин. За допомогою правильної інформації і проектування, можна вибрати найбільш підходящий тип посудини для конкретної програми і забезпечити ефективне та безпечне зберігання газів під тиском.

Незважаючи на переваги посудин тиску з композитних матеріалів, вони мають деякі обмеження, зокрема, вони менш стійкі до пошкоджень при зіткненні з іншими об'єктами, і вимагають більшого контролю та обслуговування для запобігання можливості руйнування.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак, при правильному використанні, посудини тиску з композитних матеріалів можуть забезпечити високий рівень безпеки та ефективності у широкому спектрі застосувань.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Обґрунтування вибору технології намотування сферичної посудини тиску

Виготовлення посудин для зберігання рідини або газу під високим тиском має велике значення у сучасному космічному виробництві. Ці посудини мають важливе завдання забезпечувати безпеку та надійність систем космічних апаратів. Існує два методи виготовлення таких посудин – це технологія намотування сферичних посудин тиску на станку з вертикальним розташуванням осі оправлення та технологія намотування сферичних посудин тиску на станку с зональним розташуванням осі оправки.

Порівняємо ці два види верстатів можна за декількома ключовими аспектами. За принципом закріплення оправки верстати з вертикальним розташуванням осі оправки мають оправку, яка закріплюється вертикально на верстаті. Це дозволяє створювати сферичну посудину тиску, намотуючи матеріал на оправку у вертикальному напрямку.

Верстати з зональним розташуванням осі оправки мають оправку, яка розташовується зонами, що охоплюють посудину тиску. Це дозволяє створювати оболонку посудини тиску, намотуючи матеріал на оправку в зонах з різними радіусами.

За типом укладання ниток у верстатах з вертикальним розташуванням осі оправки механізм укладання забезпечує перехресне укладання ниток на оправлення. Це дозволяє створювати складні перехресні структури ниток, що зміцнюють оболонку посудини тиску.

У верстатах з зональним розташуванням осі оправки механізм укладання створює оболонку, використовуючи зони з різними радіусами. Це дозволяє керувати формою та розмірами оболонки під час намотування.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Верстати з вертикальним розташуванням осі оправки є ефективними та дозволяють досягти високої якості оболонки.

Верстати з зональним розташуванням осі оправки можуть бути більш універсальними, оскільки дозволяють створювати оболонки з різними формами, включаючи сферичну. Однак, вони можуть бути менш ефективними для виробництва оболонок з високою точністю та деталізацією.

В даній роботі, ми використаємо технологію намотування сферичних посудин тиску, яка базується на використанні спеціальних верстатів з вертикальним розташуванням осі оправки, адже вона має кілька важливих переваг над технологію намотування сферичних посудин тиску з використанням станків з зональним розташуванням осі оправки.

По-перше, такі верстати забезпечують ефективне перехресне укладання ниток на оправлення, що сприяє створенню складних перехресних структур ниток. Це має важливе значення для зміцнення оболонки посудини та рівномірного розподілу навантаження під час експлуатації в космосі.

Друга перевага полягає у тому, що станки з вертикальним розташуванням осі оправки є добре розробленими та широко застосовуваними в космічній промисловості. Це означає, що доступність обладнання, запаси запчастин та технічна підтримка можуть бути легше забезпечені.

Обґрунтувати вибір станку з вертикальним розташуванням осі оправки, можна тим, що такий тип верстату дозволяє досягти оптимальних характеристик посудини тиску для космічних застосувань. За допомогою перехресного укладання ниток та створення сферичної форми оболонки, можна забезпечити високу міцність, стійкість та надійність посудини при впливі екстремальних умов в космосі.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Схема станка з вертикальним розташуванням осі оправки зображена на Рис. 3.1.

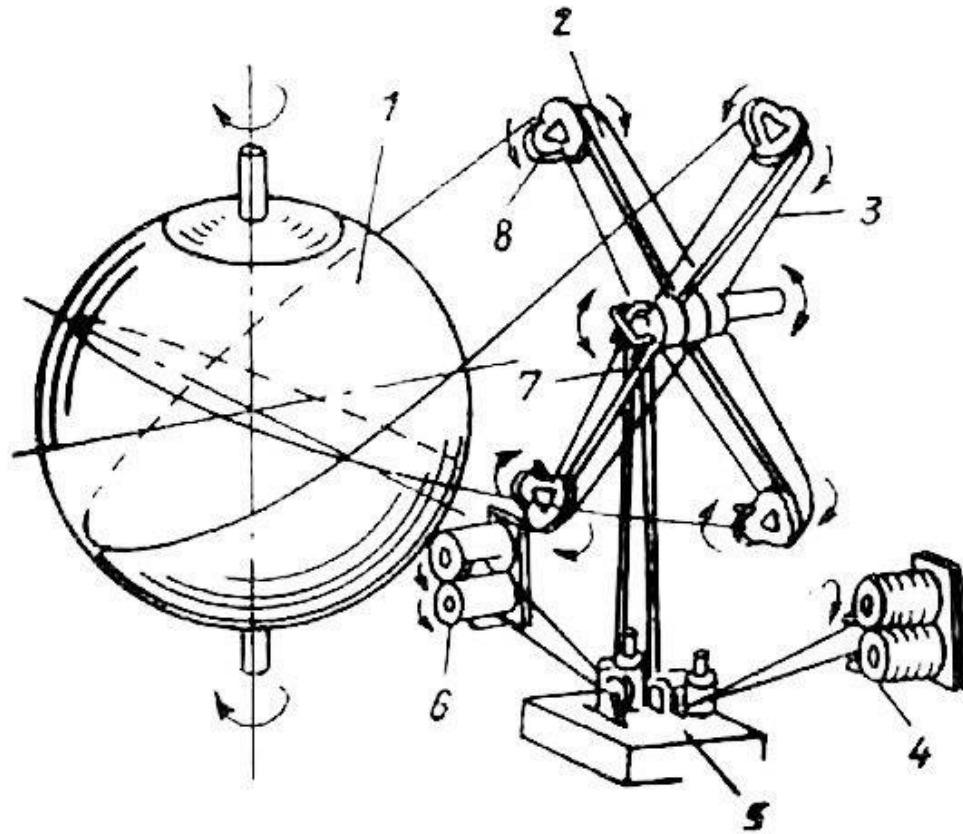


Рис. 3.1. Станок з вертикальною віссю оправлення для намотування сферичних посудин тиску:

1 – оправлення; 2 – платформа; 3 – плече роздавального механізму; 4 - шпулі з намотувальним матеріалом; 5 - натяжний механізм; 6 - шпулі з намотувальним матеріалом; 7 – роздавальний механізм; 8 – направляючий ролик

Оправка є ключовим елементом верстата, на який намотується спеціальний матеріал для створення оболонки посудини. Процес намотування починається зі змотування ниток з двох пари шпуль 4 та 6, які проходять через натяжний пристрій 5. Натяжний пристрій складається з двох автономних систем роликів, для кожної пари шпуль, які забезпечують належну натягнутість ниток під час намотування. Це важливо для отримання оболонки з високою міцністю та стійкістю до тиску.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нитки, після проходження через натяжний пристрій, подаються до механізму укладання 7, який забезпечує перехресне укладання ниток на оправлення 1. Механізм укладання зазвичай має конструкцію хрестовини з хитними плечима 3, що дозволяють створити складні перехресні структури ниток. Кінці плечей завершуються шарнірами що дозволяють самоцентруватися платформі 2 з встановленим на ній роликом 8. Це сприяє зміцненню оболонки посудини та рівномірному розподілу навантаження під час експлуатації в космосі.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок до розділу 3

Порівнюючи два типи верстатів для виготовлення намотування сферичних посудин тиску: верстатів з вертикальним розташуванням осі оправки та верстатів із зональним розташуванням осі оправки, було встановлено, що верстати з вертикальним розташуванням осі оправки мають кілька переваг. Вони дозволяють забезпечити ефективне перехресне укладання ниток на оправлення, створюючи складні перехресні структури, що сприяють зміцненню оболонки посудини.

Верстат з вертикальним розташуванням осі оправки є ефективним у виготовленні посудин тиску для космічних застосувань. Він дозволяє досягти оптимальних характеристик посудини, таких як висока міцність та стійкість, а також рівномірний розподіл навантаження. Верстат забезпечує гнучкість та доступність у виготовленні складних перехресних структур ниток, що покращує механічні властивості посудини тиску.

Усе враховуючи, технологія намотування сферичних посудин тиску з використанням станку з вертикальним розташуванням вісі оправки є найбільш доцільною для нашої дипломної роботи. Вона дозволяє отримати посудини з високою міцністю та стійкістю, які відповідають вимогам космічного застосування. Ця технологія є ефективною та надійною, забезпечуючи якісний результат виготовлення сферичних посудин тиску для космічної сфери.

Дослідження та розвиток цієї технології може сприяти покращенню якості та ефективності посудин, що використовуються у космосі, забезпечуючи безпеку та надійність космічних місій.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Визначення напружено-деформованого стану для волокнистого композиційного матеріалу.

Використання композитних матеріалів при виготовленні посудин тиску відкриває широкі можливості для оптимізації їхньої конструкції та властивостей. Однією з головних переваг використання композиційного матеріалу є висока міцність при низькій вазі. Це дозволяє створювати посудини тиску, які мають високу стійкість та надійність при великих внутрішніх тисках, але при цьому є легкими та мають менше маси.

Композитні матеріали складаються з двох або більше компонентів: матриці та армування (волокна, наповнювачі або частки). Матриця виконує роль наповнювача, що оточує армування та забезпечує його фіксацію у відповідному положенні.

Армування є основним підсилюючим елементом композитного матеріалу. Воно може бути представлено волокнами (наприклад, скловолокном, вуглецевим волокном, арамідним волокном) або наповнювачами (такими як графіт, кераміка, наночастинки). Волокна або наповнювачі розподіляються у матриці з певною структурою для покращення механічних властивостей композиту.

Властивості композитного матеріалу визначаються різними факторами, а саме: тип армування, тип матриці, відношення матриці до армування та обробка та орієнтація.

Врахування цих факторів під час проєктування та виготовлення композитних матеріалів дозволяє досягти оптимальних властивостей для конкретного застосування.

Інженерна методика, яку ми застосовуємо в даній роботі, базується на наукових принципах та систематичному підході до дослідження та розробки конструкції композитної сферичної посудини тиску. Цей підхід дозволяє нам збирати та аналізувати розрахункові дані,

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експериментальні результати та інженерні знання для отримання повного розуміння процесів, що відбуваються у матеріалі та конструкції.

Застосовуючи інженерну методику, ми можемо виконати розрахунки навантажень, провести аналіз напружень та деформацій, а також визначити оптимальні параметри конструкції для досягнення максимальної міцності та ефективності. Це дозволить нам зрозуміти, як навантаження розподіляються у композитному матеріалі та його компонентах, і як це впливає на загальні властивості та довговічність посудини тиску.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.1. Вихідні дані для проєктування волокнистого КМ.

Для початку виконання розрахунку потрібно обчислити потік нормальних напружень. Вихідними даними є діаметр і тиск, що діє зсередини балону.

Оскільки проєктована конструкція має форму сфери, волокнисті композиційні матеріали, з яких виготовлено оболонку, не матимуть зсувних навантажень, а тільки нормальні.

Тому формула для обчислення потоку нормальних напружень для осі X та осі Y матиме наступний вигляд:

$$q_{\sigma x}^{KM} = q_{\sigma y}^{KM} = \frac{PD}{4}$$

де

$q_{\sigma x}^{KM}$ – потік нормальних напружень, що діє в напрямлені осі X, кг/мм

$q_{\sigma y}^{KM}$ – потік нормальних напружень, що діє в напрямлені осі Y, кг/мм

P – внутрішній тиск, що діє всередині сфери, МПа

D – внутрішній діаметр сфери, мм

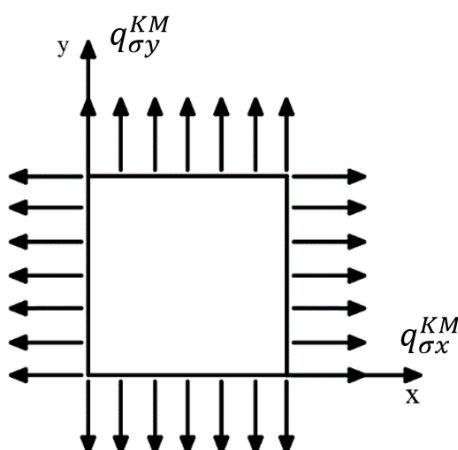


Рис. 4.1.1. Спектр навантажень.

Розраховані потоки нормальних напружень:

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$q_{\sigma x}^{KM} = q_{\sigma y}^{KM} = 27,9 \text{ кг/мм}$$

Вихідні дані для вуглепластику згідно з паспортними даними:

$$\sigma_B^0 = 85 \text{ кг/мм}^2$$

$$\sigma_B^{90} = 3,5 \text{ кг/мм}^2$$

$$\sigma_{-B}^0 = 100 \text{ кг/мм}^2$$

$$\sigma_{-B}^{90} = 9,5 \text{ кг/мм}^2$$

$$E^0 = 12000 \text{ кг/мм}^2$$

$$E^{90} = 980 \text{ кг/мм}^2$$

$$\delta^i = 0,08 \text{ мм}$$

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2. Розрахунок експлуатаційних навантажень в шарах обшивки.

Методика розрахунку включає наступні етапи аналізу і оцінки:

1. Визначення необхідної товщини композиційного матеріалу (КМ) у напрямлені 0° та 90° від розрахункових навантажень.
2. Встановлення кількості шарів композитного матеріалу з орієнтацією 0° та 90° .
3. Формування пакету для технології виготовлення методом намотки.
4. Визначення механічних характеристик пакету, що складається з шарів з орієнтацією 0° та 90° .
5. Визначення діючих напружень в пакеті в напрямках X та Y: σ_x^{KM} та σ_y^{KM} .
6. Визначення граничного стану пакету при дії комбінованих навантажень.

Проводимо розрахунки композитного пакету на основі вибраної методики.

1. Визначаємо необхідну товщину композиційного матеріалу (КМ).

У полі креслення необхідно вказати осі, напрямком яких визначають орієнтацію основи односпрямованого композиційного матеріалу. Це можна зобразити графічно наступним чином.

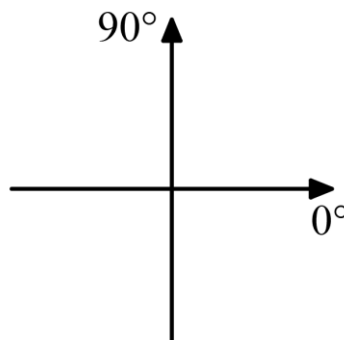


Рис. 4.2.1. Схема орієнтації основи стрічки.

Для визначення товщини композиційного матеріалу використовуємо наступні формули:

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\delta^0 = \frac{q_{\sigma x}^{KM}}{\sigma_B^0}, \text{ мм}$$

$$\delta^{90} = \frac{q_{\sigma y}^{KM}}{\sigma_B^0}, \text{ мм}$$

де

σ_B^0 – межа міцності при розтягу вздовж напрямлення 0° (вздовж основи), кг/мм²

σ_B^{90} – межа міцності при розтягу вздовж напрямлення 0° (вздовж основи), кг/мм²

Визначаємо, що

$$\delta^0 = \frac{27,9}{85} = 0,3282 \text{ мм}$$

$$\delta^{90} = \frac{27,9}{85} = 0,3282 \text{ мм}$$

2. Встановлюємо кількість шарів КМ з орієнтацією 0° та 90° .

$$n_{\text{шар}}^0 = \frac{\delta^0}{\delta^1}$$

$$n_{\text{шар}}^{90} = \frac{\delta^{90}}{\delta^1}$$

де

δ^1 – товщина моношару.

Отримані $n_{\text{шар}}^0$ та $n_{\text{шар}}^{90}$ округлимо до найближчого більшого значення. Значення n , отримані в результаті, мають дозволити створити, близький по симетричності пакет у першому наближенні.

Визначаємо n шарів:

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$n_{\text{шар}}^0 = \frac{0,3282}{0,08} = 4,1 = 5 \text{ шарів}$$

$$n_{\text{шар}}^{90} = \frac{0,3282}{0,08} = 4,1 = 5 \text{ шарів}$$

3. Формуємо пакет для технології виготовлення методом намотки.

Для методу намотки відповідно до стандартного кодового позначення маємо:

—————
90 0 90 0 0 90 0 90 0 90

де риска (————) позначає, що повної симетрії немає.

4. Визначаємо механічні характеристики пакету, що складається з шарів з орієнтацією 0° та 90°.

Для змішаної схеми викладки, в якій застосовуються шари с орієнтацією 0° та 90° розрахунок характеристик пакета для напрямлень X, Y, $\sigma^{X,Y}$, $E^{X,Y}$ при проєктувальному розрахунку можна визначити за наступними формулами.

$$[\sigma_{B_{x,y}}^{KM}] = K_y^{x,y} \sigma_B^0$$

та

$$[E_{B_{x,y}}^{KM}] = K_y^{x,y} E^0,$$

де

$K_y^{x,y}$ – коефіцієнт викладки для напрямлень X та Y;

σ_B^0 та E^0 – паспортні дані.

$$K_y^{x,y} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i^{x,y}}{n} \cos^4 \alpha_i$$

де

n_i – кількість шарів і-того кута орієнтації для X та Y;

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

n – сумарна кількість шарів;

α_i – i -тий кут орієнтації основної стрічки по відношенню до напрямлення дії навантаження і напрямлень X та Y.

$$K^{x,y} = \sum_{i=1}^n \frac{n^{x,y}}{n} + 0 \frac{n_{90}}{n}$$

де

n_0 та n_{90} – кількість шарів з орієнтацією 0° та 90° .

Визначаємо коефіцієнт викладки для напрямлення вздовж вісі X:

$$K_y^x = \frac{n_0^x}{n} + 0 \frac{n_{90}}{n} = \frac{5}{10} = 0,5$$

Визначаємо $[\sigma_{B_x}^{KM}]$ та $[E_{B_x}^{KM}]$ в напрямленні осі X:

$$[\sigma_{B_x}^{KM}] = K_y^x \cdot \sigma_B^0 = 0,5 \cdot 85 = 42,5 \text{ кг/мм}^2$$

$$[E_{B_x}^{KM}] = K_y^x \cdot E^0 = 0,5 \cdot 12000 = 6000 \text{ кг/мм}^2$$

Визначаємо коефіцієнт викладки для напрямлення вздовж вісі Y:

$$K_y^y = \frac{n_0^y}{n} + 0 \frac{n_{90}}{n} = \frac{5}{10} = 0,5$$

Визначаємо $[\sigma_{B_y}^{KM}]$ та $[E_{B_y}^{KM}]$ в напрямленні осі Y:

$$[\sigma_{B_y}^{KM}] = K_y^y \cdot \sigma_B^0 = 0,5 \cdot 85 = 42,5 \text{ кг/мм}^2$$

$$[E_{B_y}^{KM}] = K_y^y \cdot E^0 = 0,5 \cdot 12000 = 6000 \text{ кг/мм}^2$$

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Визначаємо діючі напруження в пакеті в напрямках X та Y: σ_x^{KM} та σ_y^{KM} .

Визначаємо сумарну товщину пакету:

$$\delta^{KM} = \delta^i \cdot n$$

де

δ^i – товщина моношару

$$\delta^{KM} = 0,08 \cdot 10 = 0,8 \text{ мм}$$

Визначаємо σ_x^{KM} та σ_y^{KM} за формулами:

$$\sigma_x^{KM} = \frac{q_{\sigma x}^{KM}}{\delta^{KM}}$$

$$\sigma_y^{KM} = \frac{q_{\sigma y}^{KM}}{\delta^{KM}}$$

Для нашого розрахунку, в якому обшивки із КМУ, $\delta^i = 0,08$ мм маємо:

$$\sigma_x^{KM} = \frac{27,9}{0,8} = 34,875 \text{ кг/мм}^2$$

$$\sigma_y^{KM} = \frac{27,9}{0,8} = 34,875 \text{ кг/мм}^2$$

6. Визначаємо граничний стан пакету при дії комбінованих навантажень.

$$\left[\frac{\sigma_x^{KM}}{[\sigma_{B_x}^{KM}]} \right]^2 - \frac{\sigma_x^{KM} \times \sigma_y^{KM}}{[\sigma_{B_x}^{KM}]^2} + \left[\frac{\sigma_y^{KM}}{[\sigma_{B_y}^{KM}]} \right]^2 \leq 1$$

$$\left[\frac{34,875}{42,5} \right]^2 - \frac{34,875 \times 34,875}{[42,5]^2} + \left[\frac{34,875}{42,5} \right]^2 = 0,67 \leq 1$$

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Запас міцності

$$\eta = \frac{1}{0,67} = 1,49$$

З урахуванням запасу міцності додатковий коефіцієнт безпеки

$$f_{\text{дод}} = 1,25 \times 1,49 = 1,86$$

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок до розділу 4

Матеріали на основі волоконних композитів використовуються для створення конструкцій, які вимагають високої міцності та жорсткості при дії зовнішніх навантажень. Ці властивості досягаються завдяки використанню високоміцних та високомодульних волокон. Волокна виконують роль арматури, підтримуючи конструкцію, тоді як матриці та зв'язки на границі матеріалу забезпечують міцність та стійкість композиту в цілому.

Основні фактори, що впливають на характеристики матеріалів, полягають у виборі волокон. Вибір волокон має задовольняти вимоги експлуатації та технологічні вимоги. Якісні волокна забезпечують потрібну міцність композитного матеріалу, тоді як жорсткість матриць та міцність зв'язків впливають на його стійкість.

Завдяки використанню високоміцних волокон, волокнисті композитні матеріали можуть витримувати великі навантаження, що робить їх міцними. Високомодульні волокна забезпечують жорсткість матеріалу, дозволяючи йому не деформуватися під дією сил. Матриці та зв'язки на границях матеріалу мають достатню міцність, щоб забезпечити ефективну передачу навантаження між волокнами та утримувати їх на місці.

Після розрахунку ми визначили кількість шарів, потрібних для досліджуваної конструкції. Ми впевнилися, що обраний матеріал, вуглепластик, добре підходить для використання у конструкції сферичної посудини тиску.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Технологія виготовлення епоксидних зв'язуючих

Епоксидна смола – це один з найпоширеніших зв'язуючих матеріалів, що застосовується в сучасній промисловості. Вона є полімером, отриманим шляхом реакції епоксидних смол з твердими амінами або поліамідами. Цей матеріал має високу механічну міцність, хімічну стійкість та термічну стійкість, що робить його незамінним компонентом у виробництві композитних матеріалів.

Використання епоксидної смоли у композитних матеріалах має безліч переваг. Перш за все, вони проявляють високу адгезію до різних наповнювачів, армуючих компонентів і підкладок, що забезпечує міцне зчеплення компонентів матеріалу, такими як скло, карбон, метал та інші. Така універсальність використання робить епоксидну смолу перспективним зв'язуючим матеріалом для широкого спектра додатків.

Широкий вибір доступних епоксидних смол і отверджувачів дозволяє створювати полімерні матриці з різними комбінаціями властивостей, що задовольняють потребам технології. Крім того, під час хімічної реакції між епоксидними смолами і отверджувачами не утворюється вода або леткі речовини. Вони також мають низьку усадку (2-2,5%), що дозволяє створювати високоточні конструкції. Епоксидні смоли відзначаються високою стійкістю до вологи, а затверділі смоли не тільки хімічно стійкі, але також мають добрі електроізоляційні властивості. Загалом, епоксидні смоли зазвичай перевершують інші типи смол за механічними характеристиками за нормальних умов.

Крім того, епоксидна смола має високу механічну міцність та стійкість до зовнішніх впливів, таких як удари, вібрації та термічні навантаження. Це дозволяє використовувати її у виробництві конструкцій, які потребують високої стійкості та довговічності.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Епоксидні смоли мають різноманітні фізичні властивості, залежно від їх стану - рідкого, в'язкого або твердого. Вони прозорі та можуть мати відтінки від світлого до темно-коричневого кольору. Легкість розчинення в ароматичних розчинниках, складних ефірах та ацетоні робить їх зручними у виробництві. Однак важливо відзначити, що епоксидні смоли не утворюють плівок в тонких шарах, їх плівки залишаються термопластичними.

За своєю структурою, епоксидні смоли є полімерними сполуками з епоксигрупами на кінцях (Рис.5.1.). Ці епоксигрупи є високореакційними, що дозволяє використовувати смоли у різних хімічних реакціях та процесах.

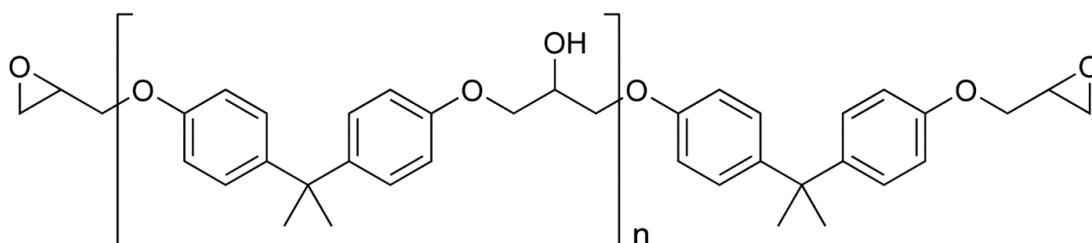


Рис. 5.1.

При взаємодії епоксидних смол з сполуками, що містять рухливий атом водню, вони здатні полімеризуватись, утворюючи нерозчинні та немасляні тривимірні продукти з високими фізико-технічними властивостями. Таким чином, термореактивність виявляється не в самій епоксидній смолі, а в її сумішах з отверджувачами та каталізаторами.

Для отвердження епоксидних смол використовують різні речовини: діаміни (гексаметилендіамін, метафенілендіамін, поліетиленполіамін), карбонові кислоти або їх ангідриди (малеїновий, фталевий).

Епоксидні смоли, у поєднанні з вищезазначеними отверджувачами, утворюють термореактивні композиції, які мають цінні властивості. Вони відрізняються високою адгезією до поверхні матеріалу, на якій вони затвердівають, мають високу діелектричну

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

міцність та механічну прочність. Крім того, вони проявляють хорошу хімічну стійкість та водостійкість.

Епоксидні зв'язуючі проявляють різноманітні експлуатаційні властивості, при цьому температура використання композитів з епоксидними связуючими може досягати 150°C, але в умовах високої температури та вологості зазвичай не перевищує 120°C.

Технологія виготовлення епоксидних смол відбувається наступним чином:

У пароводяному реакторі з нержавіючої сталі та змішувачем відбувається процес обробки епіхлоргідрину. У цьому процесі спочатку нагрівають епіхлоргідрин до температури 40-50 °С, після чого поступово додають дифенілолпропан для отримання однорідного розчину. Після цього в реактор додають розчин каустичної соди та проводять процес конденсації при температурі 60-70 °С протягом 1,5-2 годин.

Протягом усього процесу реакції в реакторі з нержавіючої сталі, обладнаного пароводяною рубашкою та змішувачем, забезпечується постійна робота змішувача. Після закінчення реакції, нагрів апарату припиняють, додають воду та продовжують перемішування. Отриману смолу залишають на стояння після зупинки перемішування.

Розділення шарів у реакторі відбувається найефективніше при температурі 40-50 °С. Після реакції відокремлюють верхній водяний шар, а решту смоли промивають теплою водою при такій самій температурі. Кількість використаної води визначається залежно від об'єму і зазвичай становить два-три рази більше.

Промивку, яка включає перемішування, стояння та відокремлення водного шару, проводять до повного видалення утвореної солі під час реакції. Контроль якості промивки здійснюють шляхом перевірки промивних вод на наявність хлору та лугу.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сушку смоли після промивки проводять у тому ж апараті. Спочатку смолу нагрівають до температури 40-50 °С, після чого підключають холодильник, використовуючи пряму схему з вакуумом, для видалення вологи шляхом конденсації у холодильнику та пініння смоли.

Альтернативно, сушку смоли можна проводити без використання вакууму при атмосферному тиску і температурі близько 120 °С. Процес сушіння триває до того моменту, коли смола стає прозорою при температурі 20-25 °С. Після завершення сушки готову смолу переливають у контейнер з алюмінієвої тари.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок до розділу 5

Технологія виготовлення епоксидних зв'язуючих має велике значення в сучасній індустрії композитних матеріалів. Використання епоксидних зв'язуючих надає ряд переваг порівняно з іншими типами зв'язуючих матеріалів.

Перш за все, епоксидні зв'язуючі володіють високою адгезією до різних наповнювачів, армуючих компонентів та підкладок, що забезпечує стійкість і міцність композитів. Крім того, широкий вибір епоксидних смол і отверджувачів дозволяє створювати полімерні матриці з різноманітними комбінаціями властивостей, що задовольняють різним вимогам технології.

Важливим перевагою є також низька усадка епоксидних зв'язуючих, що дозволяє отримувати високоточні конструкції. Крім того, епоксидні зв'язуючі мають високу стійкість до вологи та володіють як хімічною стійкістю, так і добрими електроізоляційними властивостями. Не слід забувати і про механічні характеристики, оскільки епоксидні зв'язуючі зазвичай перевершують інші типи зв'язуючих матеріалів у цьому показнику.

Технологія виготовлення епоксидних зв'язуючих є високоефективною і забезпечує отримання якісних та надійних композитних матеріалів з широким спектром застосування.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Технологія виготовлення сферичного газового балону

Виготовлення посудини тиску є складним технологічним процесом, який вимагає ретельного вивчення та вибору оптимального методу виготовлення. Від правильно обраної технології залежать не лише зовнішній вигляд та функціональність посудини, але й її міцність, довговічність, ефективність та безпека в експлуатації.

Один з важливих аспектів вибору технології виготовлення є матеріал, з якого буде виготовлена посудина. Різні матеріали мають свої унікальні властивості, які впливають на кінцеві характеристики виробу.

Правильно обрана технологія виготовлення посудини тиску має великий вплив на якість та характеристики готового виробу. Вона може забезпечити оптимальну міцність, що дозволяє посудині витримувати високі навантаження без деформацій чи пошкоджень. Довговічність посудини залежить від якості з'єднань та стійкості матеріалу до зносу. Ефективність посудини може бути покращена за рахунок оптимізації технології, що дозволяє знизити витрати матеріалів та часу виготовлення.

Технологія виготовлення сферичного газового балону включає наступні кроки:

1. Збірка та встановлення на намотувальному станку СН-6 технологічної оправки з металевими штуцерами.
2. Очищення поверхні штуцерів, які контактують з намотувальним плівковим лейнером. Поверхню штуцерів перед цим піскострують.
3. Встановлення касети з плівковим матеріалом на розкладачі намотувального станку, налаштування та регулювання механізму технологічного натягу.
4. Програмна багатошарова намотка плівкового матеріалу до отримання розрахункової товщини лейнера.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Нанесення верхнього роздільного шару фторопластової плівки та обмотка з підвищеним натягом термоусаджувальною стрічкою.
6. Термічна обробка багат шарового лейнера при температурі спекання (у даному випадку при 573 К) та охолодження його разом з піччю.
7. Вилучення з нагрівальної печі, зняття шарів термоусаджувальної стрічки та роздільного шару.
8. Зняття касети з плівкою та установка касети з вуглепластиковим препрегом.
9. Закріплення кінця намотувальної стрічки на зовнішній поверхні лейнера, встановлення розрахункового технологічного натягу та зональна намотка силової оболонки.
10. Намотування антиадгезійного роздільного шару фторопластової плівки.
11. Намотування технологічного шару термоусадочної стрічки на роздільний шар і закріплення кінця стрічки на оправці.
12. Установка оправки з намотаною оболонкою в термопіч і термообробка відповідно до технологічних режимів.
13. Вилучення оправки з виробом з термопічі, розмотування шарів термоусадочної стрічки, зняття роздільного шару.
14. Огляд і контроль поверхні силової оболонки та штуцерів, видалення затверділих надлишків зв'язуючого матеріалу.
15. Видалення технологічної оправки за допомогою промивання гарячою водою, нагрітою до температури 70...80 °С.
16. Висушування внутрішньої поверхні судна під тиском, встановлення технологічних заглушок та гідроіспити виробу на тиску 0,3...0,5 робочого тиску.

Ця технологія виготовлення є типовою для посудин тиску і може незначно змінюватися в залежності від застосовуваних матеріалів та типу оправки.

					АК9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок до розділу 6

У даному розділі була розглянута технологія виготовлення сферичного газового балону, яка має велике значення у виробництві таких продуктів. Висновки, які можна зробити з цього розділу, підкреслюють важливість правильного підходу до вибору технології та уважного виконання всіх етапів процесу.

Виготовлення сферичного газового балону є складним завданням, яке вимагає високої точності та технічних навичок. Вибір оптимальної технології виробництва та матеріалів має прямий вплив на якість та безпеку балону. Важливо враховувати характеристики матеріалу, його міцність, стійкість до тиску та температурних змін, а також ефективність виробничих процесів.

Одним з ключових аспектів технології виготовлення є формування сферичної форми балону, яке потребує спеціального обладнання та технічної експертизи. Крім того, необхідно забезпечити герметичність з'єднань та контроль якості виготовлення на всіх етапах процесу. Це гарантує надійну та безпечну роботу газового балону під час його експлуатації.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. Перевірка сферичного балону на герметичність

Герметичність - це властивість конструкції запобігати проникненню газів, рідин або парів через неї. Повністю герметичні вироби неможливо створити, оскільки не існує матеріалів, що є абсолютно герметичними. Характеристикою герметизованого виробу є ступінь не герметичності, який визначається загальною кількістю речовини, що проникає через течі даного виробу. З досвіду експлуатації різних типів космічних апаратів стало очевидним, що ступінь негерметичності їхніх компонентів, систем, відсіків та агрегатів має значний вплив на надійність апаратури та безпеку екіпажу.

Теча - це канал або пориста ділянка збірної одиниці або її компонентів, які порушують їх герметичність. Розрізняють поняття витіку та натікання. Витік - це проникнення речовини з герметизованої збірної одиниці через течі під впливом перепаду повного або часткового тиску. Натіканням називається проникнення речовини через течі всередину герметизованої збірної одиниці під впливом перепаду повного або часткового тиску. У конструкторських документах встановлюються стандарти герметичності збірних одиниць, тобто максимально допустимі загальні витрати речовини через течі даної збірної одиниці, за яких її працездатність все ще забезпечується.

Виділяються методи і засоби оцінки рівня негерметичності та методи і засоби локалізації течій, що означає виявлення негерметичної ділянки або визначення місця розташування течі. Практично всі методи випробувань на герметичність здійснюються за допомогою заповнення об'єкта дослідження контрольною речовиною, до складу якої входить пробна речовина. Прохід цієї речовини через течію виявляється селективно за допомогою детекторів (течошукачів) або індикаторів.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Робочий тиск під час перевірки на герметичність повинен бути рівним робочому тиску під час експлуатації.

Для проведення випробувань на герметичність необхідно мати чотири основні компоненти: об'єкт дослідження, систему, що наповнює об'єкт контрольною речовиною, тракт течешукання та детектор або індикатор.

В залежності від фізичного принципу детектування та властивостей контрольної речовини в об'єкті дослідження та в тракті течі, методи випробувань можна розбити на чотири групи: газоаналітичні, гідроаналітичні, газогідравлічні та манометричні методи.

Газоаналітичні методи передбачають заповнення об'єкта дослідження контрольним газом, витікання його в газоподібному тракті течешукання та запис газоаналітичною апаратурою. Гідроаналітичні методи передбачають заповнення об'єкта дослідження контрольною рідиною, витікання його в гідравлічному або пароподібному тракті течешукання і фіксування за допомогою детектора або індикаторних засобів. Газогідравлічні методи передбачають заповнення об'єкта дослідження контрольним газом, витікання його в гідравлічному тракті течешукання і запис за допомогою детектора або індикаторних засобів.

Манометричні методи передбачають оцінку негерметичності об'єкта дослідження за непрямим показником (зміни тиску) за допомогою манометричної (вакуумметричної) апаратури.

Методи випробувань на герметичність розрізняються за фізичним принципом зафіксування витоку пробної речовини. Залежно від параметрів технологічних процесів випробувань, а також конструктивно-технологічних параметрів об'єкта дослідження методи випробувань, не змінюючи фізичну сутність реалізації, можуть мати різні технологічні різновиди, які називаються способами випробувань. Залежно від режимів роботи випробувального обладнання, специфіки

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технологічної оснащення способи випробовування можуть застосовуватися в різних варіантах.

Для перевірки на герметичність проєктованого сферичного балону доцільно використати манометричні методи.

Найбільш простим та поширеним варіантом способу спаду тиску є прямий вимір. (рис. 7.1.). В цьому випадку сферичний балон заповнюють через пневмопульт до випробувального тиску $p_{вип}$ повітрям, відсікають об'єкт дослідження від магістралі заповнення пневмопульта і через якийсь час τ знову контролюють величину тиску p в балоні. Зменшення величини тиску означає про сумарну негерметичність сферичного газового балону. Величину негерметичності $Q_{од}$, Вт, визначають за формулою:

$$Q_{од} = \Delta p V / \tau,$$

де

Δp – зменшення тиску в балоні в період часу τ , Па;

V – внутрішній об'єм балону і технологічного оснащення, м³;

τ – час витримки, с.

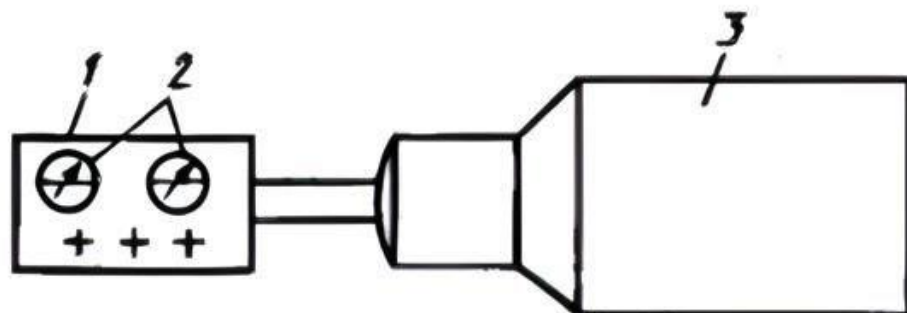


Рис. 7.1. Принципова схема випробувань методом «спадання тиску» у варіанті прямого виміру:

1 – пневмопульт; 2 – манометри (вимірювальний і контрольний); 3 – умовний об'єкт дослідження.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Чутливість даного варіанта невелика ($1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-2}$ Вт). Але у даного метода є і свої мінуси. Точність визначення величини негерметичності буде невисокою. Це обумовлено тим, що параметр Δp , за яким виконується оцінка негерметичності, вимірюється недостатньо чутливими і точними приладами – манометрами, а також тим, що при вимірюванні цього параметра мають місце і великі похибки. Також суттєво впливають похибки, які викликані виміром температури в об'єкті дослідження від час витримки і зміни атмосферного тиску. Зміна температури в відповідності до закону Гей-Люссака змінює тиск в балоні, тобто впливає на значення параметру Δp . Цей же параметр спотворює і зміну атмосферного тиску, так як манометри вимірюють надлишковий тиск відносно атмосферного. Тому для збільшення точності Δp , Па, треба визначати за формулою:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \left(1 + \frac{t_1 - t_2}{273 + t_1} \right) + (p'_{\text{атм}} + p''_{\text{атм}})$$

де

p_1 – початковий тиск в сферичному балоні, Па;

p_2 – кінцевий тиск в сферичному балоні, Па;

t_1 – температура на початку випробування, °С;

t_2 – температура в кінці випробування, °С;

$p'_{\text{атм}}$ - атмосферний тиск на початку випробування, Па;

$p''_{\text{атм}}$ - атмосферний тиск в кінці випробування, Па.

Варіант з вимірюванням в режимі термостатування дозволяє збільшити точність випробувань способом спадання тиску. При випробуваннях за цим варіантом об'єкт дослідження, тобто наш сферичний балон, ізолюють від оточуючого середовища для того, щоб виключити вплив зміни оточуючої зміни температури і атмосферного тиску.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При випробуваннях за варіантом з застосуванням еталонної ємності (рис. 7.2.) фіксують не падіння тиску в балоні за час витримки, а перепад тиску Δp між еталонною ємністю та сферичним балоном за показанням диференціального манометру. Величину негерметичності визначають за формулою:

$$Q_{од} = \Delta p V / \tau,$$

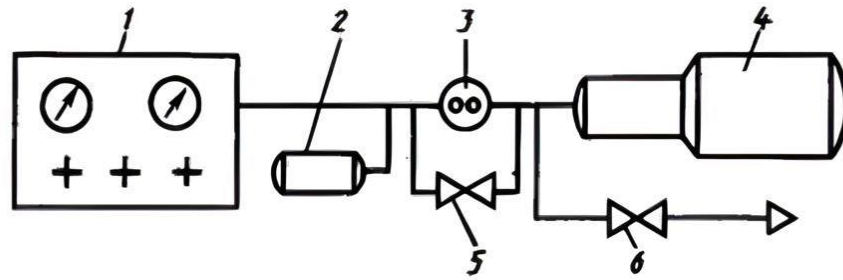


Рис. 7.2. Принципова схема випробувань методом спадання тиску з використанням еталонної ємності:

1 – пневмопульт; 2 – еталона ємність; 3 – диференціальний манометр; 4 – умовний об'єкт дослідження; 5, 6 – вентилі.

В якості еталонної ємності, обирають ємність з високим ступенем герметизації.

Цей варіант, як і компресійний метод в цілому, використовують переважно для попередніх випробувань газових балонів. Перевагами цього методу є його реалізація та низька трудомісткість.

Висновок до розділу 7

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перевірка посудин тиску на герметичність є важливим етапом в їх експлуатації, оскільки недостатня герметичність може призвести до серйозних наслідків. Забезпечення герметичності посудин тиску має вирішальне значення для безпеки персоналу та навколишнього середовища, оскільки витік рідини або газу може призвести до аварійних ситуацій, вибухів або отруєння. Додатково, герметичність також впливає на ефективність роботи посудини тиску, оскільки витрати речовини через течі можуть призвести до енергетичних втрат та зниження продуктивності. Тому регулярна перевірка герметичності посудин тиску дозволяє попередити можливі проблеми та забезпечити безпечну та ефективну роботу цих посудин.

В залежності від фізичного принципу детектування та властивостей контрольної речовини в об'єкті дослідження та в тракці течі, методи випробувань можна розбити на чотири групи: газоаналітичні, гідроаналітичні, газогідравлічні та манометричні методи.

8. Неруйнівний контроль виробів з композиційних матеріалів

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В сучасному світі авіаційна та ракетно-космічна техніка вимагають високої надійності та безпеки. Завдяки постійному розвитку науки та технологій, композиційні матеріали стали невід'ємною складовою частиною виготовлення виробів для цих галузей. Вони відзначаються високою міцністю та низькою масою, що робить їх привабливими для застосування у структурних компонентах літаків, ракет та космічних апаратів. Однак, разом з перевагами, композиційні матеріали також вносять нові виклики в процес неруйнівного контролю.

Особливістю композиційних матеріалів є те, що вони не є монолітними матеріалами, як метали. Вони складаються з матриці і армування, створюючи структурну неоднорідність та анізотропію своїх властивостей. Це ставить під загрозу якість та надійність виробів, що використовують композиційні матеріали, і вимагає використання ефективних методів неруйнівного контролю.

Однак, використання різних методів контролю композитних матеріалів стикається з викликами через їх складну структуру та специфічні фізичні властивості. Композити характеризуються великим різноманіттям типів армування, таких як однонаправлені, продольно-поперечні, комбіновані та інші. Це створює складності при визначенні оптимального методу контролю та вимагає розробки нових підходів.

Крім того, композитні матеріали мають специфічні фізичні властивості, такі як висока електроізоляційна якість, низька теплопровідність та звукоізоляція. Це ускладнює процес контролю, оскільки традиційні методи можуть бути недостатньо ефективними для виявлення дефектів.

Враховуючи вищезазначені фактори, неруйнівний контроль виробів з композиційних матеріалів стає важливим завданням для забезпечення безпеки та надійності авіаційних та космічних технологій. У даному розділі дипломної роботи будуть розглянуті різні методи

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

неруйнівного контролю, їх переваги та обмеження, а також розробка нових підходів для ефективного контролю композитних матеріалів.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						67
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

8.1. Види та причини дефектів у виробках

З метою дослідження та аналізу якості виробів з композиційних матеріалів, важливим завданням є виявлення та опис дефектів, що можуть впливати на їх ефективність та безпеку. У загальному контексті, дефекти можуть бути розділені на кілька категорій, таких як фізичні дефекти, хімічні дефекти та механічні дефекти. Давайте розглянемо кожен вид окремо.

Фізичні дефекти: Цей вид дефектів включає в себе різні аномалії у фізичних властивостях матеріалів, які можуть виникати під час їх виробництва, обробки або зберігання. Деякі приклади фізичних дефектів включають включення, порожнини, тріщини, розломи, пухирці та бульбашки, неоднорідності структури, вигини, зморшки тощо.

Включення – це неприродні об'єкти, які знаходяться всередині матеріалу. Вони можуть бути різних розмірів, форм та складу. Наприклад, включення можуть бути частинками пилу, металевими частками, битими волокнами або домішками. Включення можуть негативно впливати на механічні властивості матеріалу, зменшуючи його міцність та зносостійкість.

Порожнини або пустоти є прогалинами або порожнечами всередині матеріалу. Вони можуть виникати через неправильний процес виробництва, недостатню консолідацію матеріалу або відсутність матеріалу у певних областях. Порожнини можуть погіршувати механічні властивості матеріалу, зменшуючи його міцність та стійкість до деформації.

Тріщини – це розриви або прогалини в структурі матеріалу. Вони можуть бути видимими або мікроскопічними. Тріщини можуть виникати під час навантаження матеріалу або в результаті впливу зовнішніх

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

факторів, таких як удари або температурні зміни. Тріщини можуть знижувати міцність та стійкість матеріалу до руйнування.

Розломи – це руйнування матеріалу на макроскопічному рівні. Вони можуть бути спричинені надмірним навантаженням, втомою матеріалу, поганим контролем якості або іншими факторами. Розломи можуть мати різну природу, включаючи розриви, розриви волокон або розломи по контурі.

Деформації виникають при зміні форми або розміру матеріалу під впливом зовнішньої сили або навантаження. Надмірна деформація може призводити до пошкодження матеріалу, зміни його властивостей та втрати функціональності.

Хімічні дефекти: Ці дефекти пов'язані з некоректними хімічними процесами або неправильною хімічною структурою матеріалів. Деякі приклади хімічних дефектів включають дислокації, дефекти в кристалічній структурі, забруднення, хімічну реакцію з оточуючим середовищем, окислення, корозію, деградацію полімерних матеріалів тощо.

Домішки – це чужорідні речовини, які присутні у матеріалі в невеликій кількості. Вони можуть потрапляти до матеріалу під час процесу виробництва або являти собою небажані забруднення. Домішки можуть змінювати хімічний склад матеріалу і впливати на його фізичні та механічні властивості.

Хімічні матеріали можуть мати нерівномірний розподіл складових елементів. Це може бути результатом неправильного змішування компонентів або неоднорідності у процесі синтезу. Неоднорідний хімічний склад може призводити до зміни структури та властивостей матеріалу.

Вакансії – це порожнечі або прогалини в кристалічній структурі матеріалу, де має бути атом. Вони виникають внаслідок відсутності

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

атомів на своїх позиціях через дефекти у виробничому процесі або вплив зовнішніх факторів. Вакансії можуть впливати на механічні та електронні властивості матеріалу.

Дефекти точкової структури включають домішки або невідповідність в розміщенні атомів у кристалічній структурі матеріалу. Це може включати вакансії, підвідкладки або заміщення атомів. Дефекти точкової структури можуть впливати на фізичні та механічні властивості матеріалу, а також на його хімічну стійкість.

Дислокації – це деформаційні дефекти, які виникають у кристалічних матеріалах під впливом зовнішнього навантаження. Вони представляють собою дефекти у кристалічній структурі, де ряди атомів зміщені відносно інших рядів. Дислокації можуть впливати на механічну міцність та пластичність матеріалу.

Механічні дефекти: Цей вид дефектів пов'язаний з пошкодженням матеріалів внаслідок зовнішнього механічного впливу. Деякі приклади механічних дефектів включають тріщини, лусочки, подряпини, злами, знос, абразію, втомні пошкодження, затиснення тощо.

Пористість – це наявність пор у матеріалі, які можуть бути видимими або мікроскопічними. Вона може бути результатом неправильного змішування, невідповідного температурного режиму під час виробництва або хімічних реакцій. Пористість знижує міцність та механічну стійкість матеріалу.

Деформаційні дефекти включають деформаційні лінії, перекоси, згини та інші деформаційні аномалії, які виникають в матеріалі під дією навантаження. Вони можуть бути видимими або мікроскопічними. Деформаційні дефекти можуть впливати на міцність, жорсткість та інші механічні властивості матеріалу.

Некоректний монтаж або з'єднання матеріалів може призводити до дефектів, таких як недоліки при зварюванні, неправильне прилягання,

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відокремлення шарів тощо. Це може призвести до зниження міцності та інтегральності з'єднання.

Нестача матеріалу визначається як дефект, коли в матеріалі відсутній необхідний об'єм або розмір. Це може виникати під час виробництва або обробки матеріалу.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8.2. Види та причини дефектів у виробках із композиційних матеріалів

Серед видів дефектів композитних матеріалів є:

Включення: Це небажані частинки, які потрапляють у композитну матрицю під час її виготовлення. Включення можуть бути різних типів, таких як повітряні бульбашки, частки армуючих матеріалів, сторонні об'єкти тощо. Вони можуть знижувати міцність та зносостійкість композитного матеріалу.

Дефекти адгезії: Композити складаються з матриці та армуючих матеріалів, і дефекти адгезії виникають внаслідок поганого зчеплення між цими компонентами. Це може призводити до розколу, відклеювання та зниження міцності структури композиту.

Адгезія є важливим аспектом для композиційних матеріалів, оскільки вони складаються з двох або більше компонентів, які повинні міцно триматися разом. Основні дефекти адгезії, які можуть виникати в композитах, включають наступне:

Дефекти поверхні можуть виникати під час підготовки поверхні перед склеюванням або злиттям компонентів композиту. Це можуть бути забруднення, залишки попередніх шарів, оксидні плівки або неправильно оброблені поверхні. Такі дефекти можуть погіршити адгезію і знизити міцність з'єднання.

Волоконне розсіяння: У волокнистих композитах, які складаються з матриці і армуючих волокон, дефекти адгезії можуть виникати внаслідок недостатньої проклеювання волокон з матрицею. Це може призвести до відокремлення волокон від матриці та послаблення міцності композитного матеріалу.

Композитні матеріали можуть бути піддані хімічній деградації, що може впливати на адгезію між матрицею і армуючими волокнами. Це

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

може бути спричинено впливом агресивних середовищ, хімічних реакцій або високої температури. Деградація матриці може знизити міцність і тривалість служби композитного матеріалу.

В процесі виробництва композитів можуть виникати дефекти адгезії, такі як неправильне змішування компонентів, недостатня проникність матриці у волокна або недостатнє стиснення під час формування. Ці дефекти можуть призвести до слабкої адгезії між компонентами і зниження міцності композитного матеріалу.

Розриви волокон: Композиційні матеріали, які мають волокнисту структуру, можуть мати дефекти у вигляді розривів або розміщення волокон. Це може знизити міцність та жорсткість композиту.

Розрив волокон означає відокремлення або злам волокон від матриці, що може впливати на міцність і довговічність композитного матеріалу.

Він може бути спричинений різними факторами. Один з найпоширеніших чинників - це надмірне навантаження на волокна. Волокна можуть бути піддані напруженням, які перевищують їх міцність або можуть виникнути через неконтрольовані механічні пошкодження під час виробництва, монтажу або експлуатації.

Розрив волокон може призвести до зниження міцності і стійкості композитного матеріалу. Волокна, які втратили свою цілісність, втрачають свою здатність передавати напруження і розподіляти навантаження по композиту. Це може призвести до слабших механічних характеристик, зниження довговічності та розповсюдження деформацій по композиту.

Розрив може мати різні характеристики залежно від типу волокон та механізму руйнування. Наприклад, він може бути поодиноким або груповим, вертикальним або горизонтальним, чистим або з руйнуванням

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матриці поруч. Також можуть виникати деформації і мікротріщини вздовж розриву волокон.

Для виявлення і контролю цього дефекту використовують різні неруйнівні методи, такі як ультразвуковий контроль, рентгенівська томографія, термографія та інші, оскільки розрив волокон може бути важко виявити візуально, особливо в глибоких шарах композиту.

Запобігання дефектам розриву включає правильний вибір матеріалів, контроль якості виробництва, належне управління процесом ламінування та монтажем, а також використання відповідних технологій ремонту в разі виявлення дефектів.

Цей дефект може значно впливати на характеристики композитних виробів, зокрема на їх міцність, жорсткість, довговічність та робочі властивості. Враховуючи цей дефект при проектуванні та виробництві, можна забезпечити покращення якості та безпеки композитних матеріалів.

Дефекти утворення: У процесі виготовлення композитів можуть виникати дефекти, такі як неправильне змішування компонентів, нерівномірне розподілення армуючих матеріалів або некоректне затвердження матеріалу. Ці дефекти можуть призводити до нерівномірності властивостей композиту.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8.3. Методи неруйнівного контролю композиційних матеріалів

Серед методів неруйнівного контролю композиційних матеріалів є:

1. Інфрачервоний (термічний) метод неруйнівного контролю.

Інфрачервоний (термічний) метод неруйнівного контролю (МНК) є одним з ефективних засобів виявлення дефектів у композитних матеріалах. Цей метод використовується для оцінки інтегральних властивостей композитів, виявлення пор, пазирів, неоднорідностей та інших дефектів, що можуть впливати на якість і міцність матеріалу.

Принцип роботи інфрачервоного МНК полягає в вимірюванні інфрачервоного випромінювання, що випромінюється композитним матеріалом під час його нагріву або охолодження. Композит піддається нагріву або охолодженню, і інфрачервоний радіометр реєструє температуру поверхні матеріалу.

Радіометр - це прилад, який використовується в інфрачервоних (термічних) методах неруйнівного контролю для вимірювання температури поверхні матеріалу. Він є ключовою складовою для здійснення точних і чутливих вимірювань теплових потоків.

Радіометри, що застосовуються в інфрачервоних МНК, здатні вимірювати температуру з високою точністю, з похибкою менше 0,1 °С. Це дозволяє виявити навіть незначні зміни температури, пов'язані з наявністю дефектів у матеріалі.

Ці прилади працюють на принципі реєстрації інфрачервоного випромінювання, що випромінюється поверхнею матеріалу під час нагріву або охолодження. Вони мають чутливі детектори, які сприймають інфрачервоне випромінювання і перетворюють його на

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електричний сигнал. Цей сигнал потім обробляється і використовується для вимірювання температури.

Радіометри, що використовуються в інфрачервоних МНК, є високочутливими і дозволяють проводити швидкі і точні вимірювання температури поверхні матеріалу. Вони можуть бути ручними пристроями або вбудовані в автоматизовані системи контролю.

Під час нагрівання або охолодження композитного матеріалу тепловий потік розподіляється по всій його структурі. У випадку відсутності дефектів, розподіл тепла буде рівномірним, і температура поверхні матеріалу буде однорідною. Однак, якщо в структурі композиту присутні дефекти, такі як пори, пухирі або неоднорідності, вони можуть впливати на розподіл тепла, що призводить до зміни температури на поверхні.

Під час інфрачервоного МНК для композитних матеріалів проводяться точкові виміри температури, побудова температурних профілів та визначення температури поверхонь. За допомогою інфрачервоного радіометра фіксується і реєструється температура в різних точках поверхні матеріалу. Зміни температури, які виявляються в околицях дефектів, можуть свідчити про їх наявність.

Окрім точкових вимірів, інфрачервоний МНК може також використовуватися для побудови термічних зображень і карт температури поверхні композиту. Це дозволяє візуально виділити області зі зміненою температурою, що можуть вказувати на наявність дефектів.

Інфрачервоний (термічний) метод неруйнівного контролю є ефективним і зручним способом для виявлення дефектів у композитних матеріалах. Він забезпечує високу точність вимірювання температури і дозволяє виявити навіть незначні зміни, пов'язані з дефектами у структурі матеріалу. Цей метод може бути застосований як при

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нагріванні, так і при охолодженні зразка, що робить його універсальним для різних ситуацій контролю. Завдяки своїй простоті у використанні та низькій вартості, інфрачервоний (термічний) МНК є привабливим вибором для виявлення дефектів у композитних матеріалах.

2. Звуковий метод неруйнівного контролю

Звуковий метод неруйнівного контролю є ефективним і широко використовуваним інструментом для оцінки стану композитних матеріалів. Цей метод базується на використанні звукових хвиль і сприйнятті їх людським вухом в діапазоні частот від 10 Гц до 20 КГц. Він дозволяє виявляти дефекти, такі як тріщини, розшарування, порожнечі та інші неоднорідності в структурі матеріалу.

Принцип роботи звукового методу полягає в надсиланні звукових хвиль через матеріал і аналізі отриманих відгуків. Зазвичай використовуються трансдюсери, які генерують звукові хвилі і приймають їх відбиття від внутрішніх дефектів матеріалу. Звукові хвилі проникають у матеріал і взаємодіють з його структурою, відбиваючись або проходячи крізь дефекти.

Під час контролю звуковим методом спостерігаються деякі характеристики звукових сигналів, які можуть свідчити про наявність дефектів. Наприклад, зміна інтенсивності, амплітуди, частоти або затухання звуку може бути індикатором наявності тріщин, розшарувань або порожнеч. Чистий, дзвінкий звук свідчить про тверду і зв'язану структуру матеріалу, тоді як глухий або швидко затухаючий звук може вказувати на неоднорідності або розриви в композитному матеріалі.

Для виявлення дефектів звуковий метод може використовуватися в різних режимах. Наприклад, метод прослуховування дозволяє прослуховувати звукові сигнали, що генеруються під час навантаження або випробування матеріалу. Зміна інтенсивності чи характеру цих звуків може служити ознакою появи або розвитку дефектів. Крім того,

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

метод ехолокації використовується для отримання візуалізованих зображень внутрішньої структури матеріалу на основі відбитих звукових хвиль.

Звуковий метод неруйнівного контролю для композитних матеріалів є надійним і широко застосовуваним інструментом. Він дозволяє оперативно виявляти дефекти, контролювати якість виробництва та оцінювати механічні характеристики матеріалу. Застосування звукового методу сприяє забезпеченню безпеки та надійності конструкцій, що використовують композитні матеріали, і допомагає попереджати можливі аварійні ситуації.

3. Ультразвуковий метод неруйнівного контролю.

Ультразвуковий метод неруйнівного контролю є ефективним засобом виявлення дефектів і оцінки якості композитних матеріалів. Композитні матеріали є структурно складними і складаються з матриці, яка оточує армовані наповнювачі. Акустичні методи, що використовуються в ультразвуковому контролі, включають частоти, що перевищують 20 КГц, зазвичай у діапазоні від 100 КГц до 25 МГц.

Ультразвуковий метод неруйнівного контролю базується на принципах поширення та відбиття ультразвукових хвиль у матеріалах. За допомогою спеціальних ультразвукових пристроїв, таких як п'єзоелектричні перетворювачі, ультразвукові хвилі генеруються і направляються вздовж поверхні композитного матеріалу. Під час поширення хвиль в матеріалі, вони змінюються при зустрічі з дефектами, такими як пухирі, тріщини, включення або дефектні шари.

При проходженні через дефект, ультразвукові хвилі відбиваються і повертаються назад до приймача. За допомогою спеціального обладнання, зокрема ультразвукового дефектоскопа, можна отримати інформацію про затримку, амплітуду та форму відбитих хвиль.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналізуючи ці дані, можна виявити наявність дефектів, їх розміри, глибину та характер.

Ультразвуковий метод неруйнівного контролю дозволяє виявляти різноманітні дефекти в композитних матеріалах, включаючи тріщини, включення, розтріскування, дефектні шари та інші. Крім того, цей метод дозволяє оцінювати якість зв'язку між матрицею і наповнювачем, виявляти зони зниженої міцності та проводити контроль якості під час виготовлення композитних виробів.

Ультразвуковий метод неруйнівного контролю використовує можливість введення ультразвукового променя під різними кутами до поверхні виробу, що дозволяє створювати хвилі різних типів, таких як нормальні, поздовжні, поперечно-поздовжні і т.д.

Завдяки високочастотній апаратурі з частотами $1,2 \div 5$ МГц, метод має високу чутливість для виявлення дефектів розміром 1 мм і більше. В твердих тілах можуть присутні різні типи хвиль. По вільній поверхні твердого тіла можуть поширюватися поверхневі хвилі або хвилі Релея, які затухають на глибині, порівнянній з їх довжиною хвилі.

В результаті хвильового ефекту в пластинах і стержнях формуються нормальні хвилі, відомі як хвилі Лемба, а також стержневі хвилі, відомі як хвилі Порхгаммера. Швидкість поширення хвиль залежить від пружних характеристик твердих тіл, які характеризуються двома незалежними пружними константами: модулем Юнга E і модулем зсуву G . Послаблення амплітуди хвиль у середовищі визначається затуханням, яке підпорядковується відповідному закону:

$$A = A_0 e^{-\delta x}$$

де δ – коефіцієнт затухання;

x – відстань від джерела хвилі.

Коефіцієнт затухання складається із коефіцієнтів поглинання і розсіювання:

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\delta = \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{р}}$$

Акустичні методи неруйнівного контролю можна умовно поділити на дві групи: активні і пасивні. Активні методи використовують випромінювання і прийом акустичних хвиль, в той час як пасивні методи базуються лише на прийомі хвиль.

Активні методи можна поділити на дві підгрупи: методи, які використовують проходження хвиль, і методи, які використовують відбиття хвиль. Методи проходження включають тіньовий метод, часовий тіньовий метод, дзеркально-тіньовий метод і велосиметричний метод. У тіньовому методі амплітуда хвилі, що пройшла через дефект, зменшується. У часовому тіньовому методі реєструється запізнення імпульсу, викликаного взаємодією з дефектом. Дзеркально-тіньовий метод полягає у вимірюванні послаблення сигналу, який відбивається від протилежної поверхні виробу. Велосиметричний метод базується на зміні швидкості поширення пружних хвиль при наявності дефекту.

Методи відбиття включають луна-метод, дзеркальний луна-метод і дельта-метод. Луна-метод полягає у реєстрації ехо-сигналів від дефекту. Дзеркальний луна-метод використовує дзеркальне відбиття імпульсів від вертикально орієнтованих дефектів. При дельта-методі розсіяні хвилі від перетворювача А приймаються перетворювачем Б безпосередньо над дефектом.

Імпедансний метод відрізняється від інших методів. Він базується на аналізі змін механічного імпедансу досліджуваної поверхні об'єкта. Зміна імпедансу визначається характеристиками коливань перетворювача, такими як частота, амплітуда і фаза. Вільні коливання в об'єкті зазвичай викликаються механічним ударом, а вимушені коливання - за допомогою гармонійної сили зі змінною частотою. Стан

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						80
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

об'єкта (наявність або відсутність дефекту) аналізується за власною частотою вільних коливань або за резонансами вимушених коливань.

Однією з переваг ультразвукового методу є його неінвазивність, тобто він не пошкоджує тестовий зразок під час контролю. Крім того, цей метод є швидким і може бути автоматизованим для великосерійного виробництва.

Ультразвуковий метод неруйнівного контролю для композитних матеріалів знаходить широке застосування в промисловості, де необхідно забезпечити високу якість і надійність продукції. Він дозволяє виявляти дефекти на ранніх стадіях, що сприяє запобіганню виникненню аварійних ситуацій та зниженню витрат на ремонт і заміну компонентів.

Усе вищевикладене свідчить про те, що ультразвуковий метод неруйнівного контролю є потужним і надійним інструментом для виявлення дефектів та контролю якості композитних матеріалів. Завдяки своїм перевагам і широкому спектру застосувань, він стає невід'ємною частиною виробництва та експлуатації композитних виробів.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок до розділу 8

Неруйнівний контроль є важливою складовою процесу контролю якості виробів. Він дозволяє виявляти потенційні дефекти та недоліки без необхідності знищення або пошкодження випробуваного об'єкта. Загальний неруйнівний контроль включає в себе різні методи та техніки, які забезпечують здатність виявляти дефекти різного характеру та розміру.

Особлива увага в рамках неруйнівного контролю приділяється виробам з композиційних матеріалів. Композитні матеріали, такі як волоконно-пластикові композити, мають складну структуру та властивості, що вимагають специфічних методів контролю. Завдяки високій міцності та легкості, вони широко застосовуються в авіаційній, космічній, автомобільній та інших галузях промисловості. Однак, дефекти у композитах можуть виникати під час виготовлення або в експлуатації, що може негативно позначитися на їхній продуктивності та безпеці.

У неруйнівному контролі композитних матеріалів широко використовуються такі методи, як термічний контроль, звуковий контроль та ультразвуковий контроль. Термічний контроль базується на вимірюванні теплових характеристик матеріалу, зокрема розподілу температури, для виявлення аномалій або дефектів. Звуковий контроль використовує випромінювання та прийом звукових хвиль для виявлення дефектів, таких як тріщини або пустоти. Ультразвуковий контроль, зокрема, базується на використанні ультразвукових хвиль, які проникають в матеріал і використовуються для вимірювання товщини, виявлення дефектів та аналізу структури.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У підсумку, неруйнівний контроль виробів з композиційних матеріалів відіграє важливу роль у забезпеченні якості та надійності продукції. Використання різних методів контролю, таких як термічний, звуковий та ультразвуковий, дозволяє ефективно виявляти та аналізувати дефекти в композитних матеріалах, сприяючи покращенню їхньої якості та безпеки. Постійний розвиток технологій неруйнівного контролю допомагає підвищити ефективність і точність процесу контролю, що є важливим аспектом в сучасній промисловості.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						83
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок

У бакалаврській роботі була проаналізована проблема проєктування сферичного газового балону, виготовленого з вуглепластику, включаючи вирішення наступних завдань.

Були проведені аналіз характеристик сучасних композитних матеріалів та їх перспективи в майбутньому, з урахуванням різних видів армуючих матеріалів та матриць. З метою подальших розрахунків були обрані найбільш оптимальні матеріали, що відповідають вимогам поставленої задачі.

У роботі було досліджено різноманітні типи посудин тиску та їх переваги, а також проаналізовані використання композитних матеріалів для таких посудин та переваги їх експлуатації. Було виявлено, що використання композитних матеріалів може покращити міцність, легкість та корозійну стійкість посудин тиску, що забезпечує довговічність та безпеку їх використання. Додатково, композитні матеріали можуть бути більш гнучкими у проєктуванні, що дозволяє створювати посудини з різними формами та обсягами в залежності від потреб додаткової сфери застосування.

Було проведено порівняльний аналіз двох технологій намотування сферичних посудин тиску: технологія намотування на станку з вертикальним розташуванням осі оправлення та технологія намотування на станку з зональним розташуванням осі оправки. Після оцінки параметрів та переваг кожного методу була обрана найоптимальніша технологія для виготовлення сферичних посудин тиску.

На початковому етапі розрахунку було встановлено потік нормальних напружень. Розглянуті кроки визначення необхідної товщини та кількості шарів композитного матеріалу з орієнтацією 0° та

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						84
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

90° для виробництва посудини. Сформований пакет шарів був підданий аналізу його механічних характеристик, а також визначенню діючих напружень в напрямках X та Y. Крім того, проведено оцінку граничного стану пакету при дії комбінованих навантажень. Цей аналіз допоможе забезпечити вибір оптимальної конфігурації та досить міцного та безпечного пакету для виготовлення посудини тиску.

Було підтверджено, що обраний композитний матеріал відповідає вимогам поставленої задачі і може бути використаний для реалізації нашої роботи. Отримане значення запасу міцності дорівнює $\eta = 1,49$.

Досліджено різні методи перевірки на герметичність. Було обрано манометричний метод, перевагами якого є його реалізація та низька трудомісткість.

В роботі розглянута технологія виготовлення епоксидних зв'язуючих для композиційних матеріалів, а також наведено переваги, які вони мають порівняно з іншими типами зв'язуючих матеріалів.

Було вибрано оптимальну технологію виготовлення, яка відповідає вимогам для нашої досліджуваної конструкції сферичного газового балону. Ця технологія дозволяє забезпечити необхідну міцність, довговічність та безпеку посудини тиску.

Для забезпечення вимог щодо точності деталі необхідно здійснювати контроль матеріалу, і у дипломній роботі були представлені методи неруйнівного контролю композиційних матеріалів. Ці методи дозволяють виявляти різноманітні виробничі та експлуатаційні дефекти, такі як кручення, включення, дефекти адгезії, розриви волокон, подряпини, вм'ятини, волоконне розсіяння, розшарування та інші.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						85
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Valery V. Vasiliev. Composite Pressure Vessels: Analysis, Design, and Manufacturing
2. Peter Fortescue, Graham Swinerd, John Stark. Spacecraft Systems Engineering, 2011. — 728 p.
3. Barbero, Ever J. Introduction to composite materials design, 2017. — 525 p.
4. Копань В.С. Композиційні матеріали.— К.: Унів. Вид-во “Пульсари”, 2004.— 200 с.: іл.— Бібліогр.: с. 190-196.
5. John Wanberg. Composite Materials: Fabrication Handbook #2, 2010. — 144 p.
6. Valery V. Vasiliev and Evgeny V. Morozov. Mechanics and Analysis of Composite Materials Elsevier, Amsterdam, 2001
7. Gu, H.B.; Liu, C.T.; Zhu, J.H.; Gu, J.W.; Wujcik, E.K.; Shao, L.; Wang, N.; Wei, H.; Scaffaro, R.; Zhang, J.X.; et al. Introducing advanced composites and hybrid materials. Adv. Compos. Hybrid Mater. 2018, 1, 1–5.
8. Valery V. Vasiliev and Evgeny V. Morozov. Advanced Mechanics of Composite Materials Fisevier, Amsterdam, 2007
9. Baker, A. A. (Alan A.) Composite materials for aircraft structures / Alan Baker, Stuart Dutton, and Donald Kelly — 2nd ed., 2004. — 602 p.
10. Deborah D.L. Chung. Carbon Fiber Composites, 1994. — 215 p.
11. Peter Morgan. Carbon Fibers and Their Composites, 2005. — 1200 p.
12. Satish Kumar. Fibers from polypropylene/nano carbon fiber composites, 2002
13. Wikipedia. The Free Encyclopedia. Carbon-fiber-reinforced polymers https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon-fiber-reinforced_polymers
14. Pat B. McLaughlan, Scott C. Forth, Lorie R. Grimes-Ledesma. Composite Overwrapped Pressure Vessels, A Primer, 2011. — 30 p.
15. Menon, E. Shashi. Gas pipeline hydraulics, 2005. — 406 p.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

16.Saeid Mokhatab, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil, David Wood. Handbook of Liquefied Natural Gas, 2013. — 624 p.

17.Charles J. Hellier. Handbook of nondestructive evaluation, 2003. — 594 p.

					AK9102.30.61.00.00ПЗ	Аркуш
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		