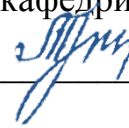


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Кораблебудівний навчально-науковий інститут
Кафедра будівельної механіки та конструкції корпусу корабля

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри, д.т.н., професор



Л.І. Коростильов

“24 ” 06 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти бакалавра

на тему: Проектування та технологія виготовлення
композитного дельтаплану

Виконав: студент групи 4161

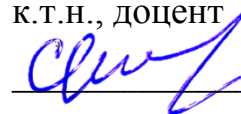


Сергунін І.О.

Керівник роботи:

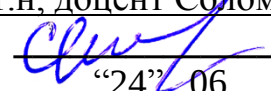
Доцент кафедри БМ та ККК,

к.т.н., доцент



Соломонюк Н.С.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Кораблебудівний навчально науковий інститут
Кафедра будівельної механіки та конструкції корпусу корабля
Спеціальність 134 «Авіаційна та ракетнокосмічна техніка»
Освітня програма «Проектування та виробництво конструкцій із композиційних матеріалів»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Гарант освітньої програми
к.т.н., доцент Соломонюк Н.С.

«24» 06 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти бакалавра

Студенту Сергуніну Івану Олексійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Проектування та технологія виготовлення композитного дельтаплану.

Керівник роботи: Соломонюк Н.С., канд.техн.наук,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора № 401уч від 14.05 2025 року

2. Термін подання роботи 15.06.2025.

3. Вихідні дані по роботі: об'єкт – двосекційна трубка дельтаплану з довжиною секції 2130 мм, зовнішнім діаметром 42 мм та товщиною стінки 1 мм.

4. Перелік питань, що належать до розробки

1) Провести аналіз існуючої конструкції дельтаплану .

2) Розрахувати навантаження які витримує аналогічна трубка з дюр-алюмінію

3) Вибрати матеріал, з якого виготовлятиметься трубки, смоли та обладнання.

4) Зробити висновки стосовно доцільності використання композиційних матеріалів для будівництва рам дельтапланів та результатів розрахунків параметрів трубок, збтти порівняльний аналіз

5. Перелік презентаційних матеріалів__

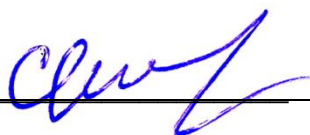
- 1) Загальний вигляд рами розглянутого дельтаплану
- 2) Розрахункова схема випробування бічної трубки рами
- 3) Розрахунки необхідної кількості шарів композитного пакету та його товщини,
- 4) Склад композиту. Механічні характеристики складових компонентів,
- 5) Модель армування композиту,
- 6) Порівняльна характеристика композитного та алюмінієвого стрижня

6. Дата видачі завдання 10.02.25

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючої конструкції	02.05.25	виконано
2	Проектування композитного стрижня	13.05.25	виконано
3	Технологія виготовлення	27.05.25	виконано
4	Підготовка до представлення роботи	08.06.25	виконано

Студент  Сергунін І.О.
(підпис) (ПІБ)

Керівник роботи  Соломонюк Н.С.

АННОТАЦІЯ

Дипломна робота під назвою «Проектування та технологія виготовлення композитного дельтаплану» присвячена вдосконаленню існуючих конструкцій каркасів дельтапланів шляхом оптимізації ваги та підвищення міцності елементів каркаса.

У цій роботі запропоновано модель бічної трубної секції дельтаплану, виготовленої з полімерного композитного матеріалу (вуглецевого волокна), що забезпечує необхідну жорсткість і мінімальну вагу.

Визначено оптимальну структуру композитного матеріалу та геометричні параметри стрижневих елементів, що гарантують експлуатаційну надійність під час польоту.

Розроблено технологічний процес виготовлення композитної рами дельтаплану та обрано відповідні методи контролю якості.

Ключові слова: рама дельтаплану, вуглецеве волокно, пулвіндінг

ABSTRACT

The diploma thesis titled "Design and Manufacturing Technology of a Composite Hang Glider" focuses on improving existing hang glider frame structures by optimizing weight and enhancing the strength of frame elements.

This work proposes a model of the lateral tube section of a hang glider made from a polymer composite material (carbon fiber), which ensures the required stiffness and minimal weight.

The optimal structure of the composite material and the geometric parameters of the rod elements have been determined to guarantee operational reliability under flight loads.

A technological process for manufacturing the composite hang glider frame has been developed, and appropriate quality control methods have been selected.

Keywords: hang glider frame, carbon fiber, pulwinding

					КР. 134.4161.03.ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ	9
1.1. Коротка історія розвитку дельтпланеризму	9
1.2. Аналіз трубчатої рами дельтаплану «Славутич-УТ»	9
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ КОМПОЗИТНОГО СТРИЖНЯ	15
2.1. Вибір компонентів композитного матеріалу.	15
2.2.1. Принциповий вибір наповнювача	15
2.2.2. Принциповий вибір матриці	17
2.2. Вибір технології вироблення	20
2.3. Кінцевий вибір вуглеволокна та смоли.	26
2.5. Розрахунок міцності окремих односпрямованих шарів	29
2.5. Розрахунок та вибір композитного пакету	33
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ	48
3.1 Підготовка вхідних компонентів.	49
3.2. Приготування компонентів та контроль.	50
3.3. Виготовлення вуглепластикових трубок.	51
ВИСНОВКИ	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	53

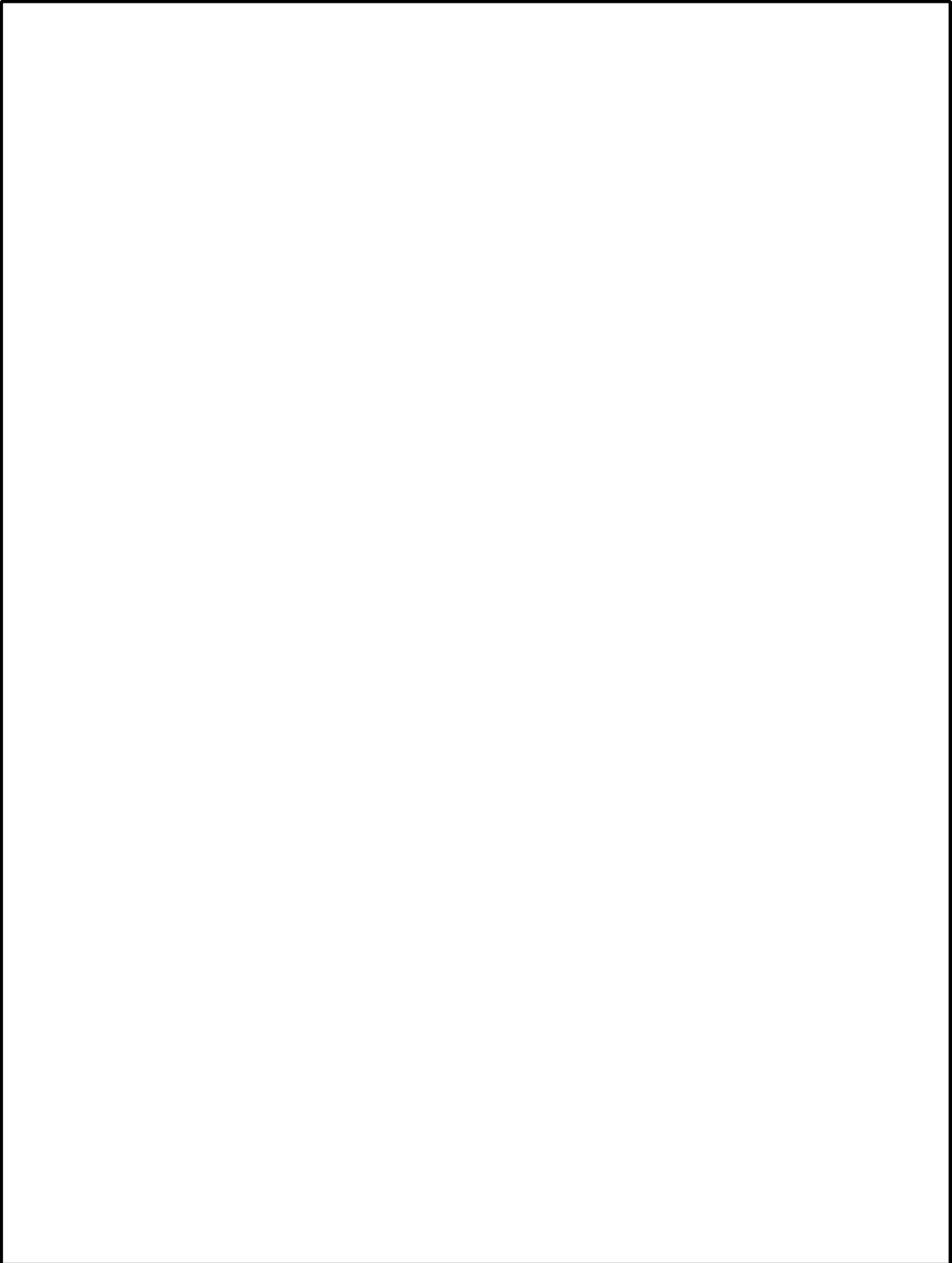
ВСТУП

Вибір матеріалу для виготовлення рам дельтапланів є критичним завданням, яке впливає на їхні льотні характеристики, довговічність та безпеку. Традиційно для цього використовуються алюмінієві трубки, які мають низку позитивних властивостей, таких як висока міцність та відносно низька вартість. Проте з розвитком матеріалознавства та технологій композитні матеріали, зокрема карбонові волокна, набувають все більшої популярності.

Проте різновидів композитних матеріалів та технологій їх виготовлення існує величезна кількість. У цьому контексті важливо вибрати матеріал та технологію та провести аналіз та порівняння композитних і алюмінієвих трубок, розглянути перспективи розвитку композитних матеріалів та оцінити доцільність їх використання для рам дельтапланів.

Мета роботи: спроектувати та розробити технологію виготовлення поперечної композитної ресори для легкового автомобіля.

					КР. 134.4161.03.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		6



					КР.134.4161.03.ПЗ.01					
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата						
Студент		Сергунін І.О			Аналіз існуючої конструкції			Літ.	Аркуш	Аркушів
Керівник		Соломонюк Н.С..							7	
Консульт.								НУК ім. адмірала Макарова		
Н. Контр.		Захарова І.О.								
Зав. каф.		Коростильов Л.І.								

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ

1.1 Коротка історія розвитку дельтапланеризму

Дельтаплан, а точніше його предок під назвою Альберт Берлінгер, з'явився дуже рано в 1811 році і був вдосконалений в 1890 році Отто Лілієнталем. Але саме під час підкорення космосу робота над дельтапланом була найбільш інтенсивною. NASA шукало найкращий спосіб ковзання космічних капсул після їх повторного входу в атмосферу. Зрештою переміг класичний парашут, але на перший план вийшов дельтаплан. У 1960-х роках ми знаходимо таких піонерів, як австралієць Білл Мойес, який здійснив перший в історії вільний політ на дельтаплані. Тоді народилося багато викликів: політ над статуєю Свободи в Нью-Йорку чи Ейфелевою вежею в Парижі.

Але саме в 1973 році француз Крістіан Поль-Депасс зі своєю компанією Delta зареєстрував першу марку дельтапланів у світі: марку DELTA-PLANE, яка з тих пір дала назву цьому літальному апарату.

В другій половині 20-го століття рами дельтапланів виготовлювали з різних сплавів алюмінію. Зараз ж дюралюміній (або скорочено дюраль) конкурує з композитними матеріалами.

1.2 Аналіз трубчатой рами дельтаплана «Славутич-УТ»

«Славутич-УТ» - один з найкращих дельтапланів в світі розроблених у 80-90 роках минулого століття. Конструкція «Славутича-УТ» – класична: трубчастий каркас, тросова система розтяжки та обливка з профільюючими елементами – латами. Апарат оснащений знімними колесами безпеки та антипікувальним пристроєм. У комплект також входить підвісна система.

Каркас трубчастий, основні елементи з'єднані між собою шарнірно в носовому, центральному та бічних вузлах.

					КР.134.4161.02.ПЗ.01	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

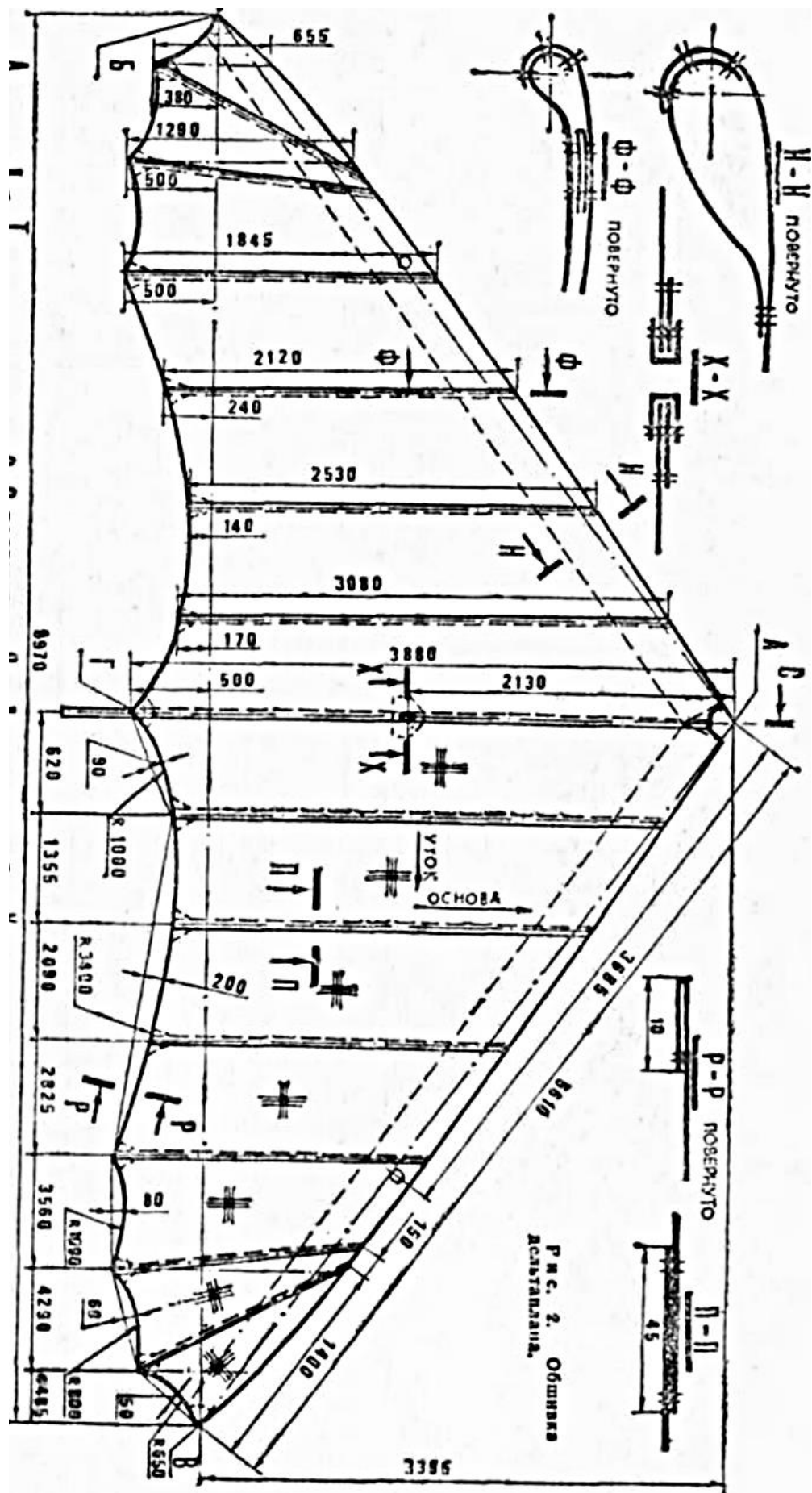


Рис.1.1 Креслення дельтаплана «Славутич-УТ»

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

КР.134.4161.02.ПЗ.01

Арк.

9

Діаметр труб передньої кромки та кіля – 42х1 мм, поперечної – 42х1,5 мм. Всі вони виготовлені з дюралюмінію Д-16Т, кожна має технологічні та експлуатаційні роз'єми. У трубах, що утворюють передні кромки, їх два; у цих місцях встановлені бужи. Середня частина передньої кромки у районі бокового вузла посилена метровим бужем.

Д16Т – алюмінієвий сплав, який володіє стабільною структурою, малою вагою, гарною міцністю, оброблюваністю та опірністю до незапланованої мікроскопічної деформації. Належить до сплавів системи Al – Cu – Mg (алюміній, мідь, магній) та легується марганцем.

Маркування Д16Т дозволяє отримати інформацію про основні властивості: Д – дюраль, 16 – порядковий серійний номер сплаву, Т – загартований, термічно зміцнений та природно зістарений (що відрізняє його від звичайного Д16). За рахунок такого набору характеристик матеріал активно використовується в кораблі-, літако-і навіть ракетобудуванні.

Хімічний склад металу Д16Т встановлюється ГОСТ 4784-97. До нього входять алюміній (до 94,7%), мідь (до 4,9%), магній (до 1,8%), марганець (до 0,9%), кремній (до 0,5%), залізо (до 0,5%) та домішки інших металів (не більше 0,15%). Присутність цих компонентів збільшує корозійну стійкість та механічну міцність сплаву. Кремній дозволяє робити зварний шов якіснішим, а включення нікелю, наприклад, дає можливість використовувати матеріал за умов високих температур.

Завдяки термічній обробці дюралюміній Д16Т стає більш міцним та пластичним. Він легко піддається різанню, куванню та штампуванню. З нього роблять листи, плити, прутки, труби та куточки. Вироби з дюралю в 3 рази легші за сталеві аналоги.

Алюмінієвий сплав 7075 є прямим конкурентом (AA7075) - це алюмінієвий сплав, основним легуючим елементом якого є цинк. Він має відмінні механічні властивості і демонструє хорошу пластичність, високу міцність, в'язкість і хорошу стійкість до втоми. Він більш сприйнятливий до крихкості, ніж багато інших алюмінієвих сплавів, через мікросегрегацію, але має значно кращу корозійну

					КР.134.4161.02.ПЗ.01	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

стійкість, ніж сплави серії 2000 року. Це один з найбільш часто використовуваних алюмінієвих сплавів для високонапружених конструкційних застосувань і широко використовується в конструкційних деталях літаків. До складу алюмінієвого сплаву 7075 приблизно входить 5,6-6,1% цинку, 2,1-2,5% магнію, 1,2-1,6% міді і менше половини відсотка кремнію, заліза, марганцю, титану, хрому та інших металів. Випускається в різних режимах, деякі з яких 7075-0, 7075-T6, 7075-T651. Перше в світі масове використання алюмінієвого сплаву 7075 було для винищувача Mitsubishi A6M Zero. Літак був відомий відмінною маневреністю, чому сприяла більш висока міцність 7075 в порівнянні з попередніми алюмінієвими сплавами.

Табл. 1.1 Характеристики широкоживаних алюмінієвих сплавів

	Д16Т	А7075 Т6
Модуль пружності, ГПа	72	71.7
Міцність на розтяг, МПа	572	420
Відносне залишкове подовження, %	10-12	11
Густина, г/см ³	2.81	2.77

Переваги алюмінієвих сплавів:

- Високий модуль пружності та стійкість на розрив : має чудову жорсткість , при достатній міцності .
- Мала вага: всі алюмінієві сплави мають відносно низьку густину, що знижує загальну вагу конструкцій, де вони використовуються.
- Зварюваність: алюміній чудово зварюється ТІГ зваркою, що дозволяє робити трубчаті конструкції з нього, та ремонтувати їх таки чином.
- Має стійкість до корозії – утворення стійкої оксидної плівки забезпечує можливість використання на відкритому повітрі .

Недоліки:

- Складність термічної обробки: Сплав вимагає точної термічної обробки для досягнення оптимальних властивостей, що може бути складним та дорогим процесом.
- Електрохімічна корозія: може бути схильним до електрохімічної корозії при контакті з іншими металами, що потребує додаткового захисту або ізоляції. А це ускладнює його використання з деталями кріпіння
- Схильність до втомного тріщиноутворення: може бути схильним до утворення тріщин під час експлуатації через високу жорсткість матеріалу.

Розглянемо кильові та бокові трубки. Їх діаметр дорівнює $d = 42$ мм а товщина стінки $t = 1$ мм.

Кильова трубка складається з двох скріплених частин довжина яких $L = 2130$ мм.

Тоді площа перерізу:

$$S = \frac{d^2 - (d - 2t)^2}{4} = 128.74, \text{мм}^2 = 1.28 \cdot 10^{-6}, \text{м}^2 ;$$

Площа дорівнює об'єму металу в одному метрі: $V = S = 1.28 \cdot 10^{-6}, \text{м}^3 ;$

Якщо взяти: $\rho = 2770, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, то можна визначити масу метра труби:

$$m_{\text{м.тр.}} = \rho V = (1.28 \cdot 10^{-6}) \cdot 2770 = 0.357, \text{кг}$$

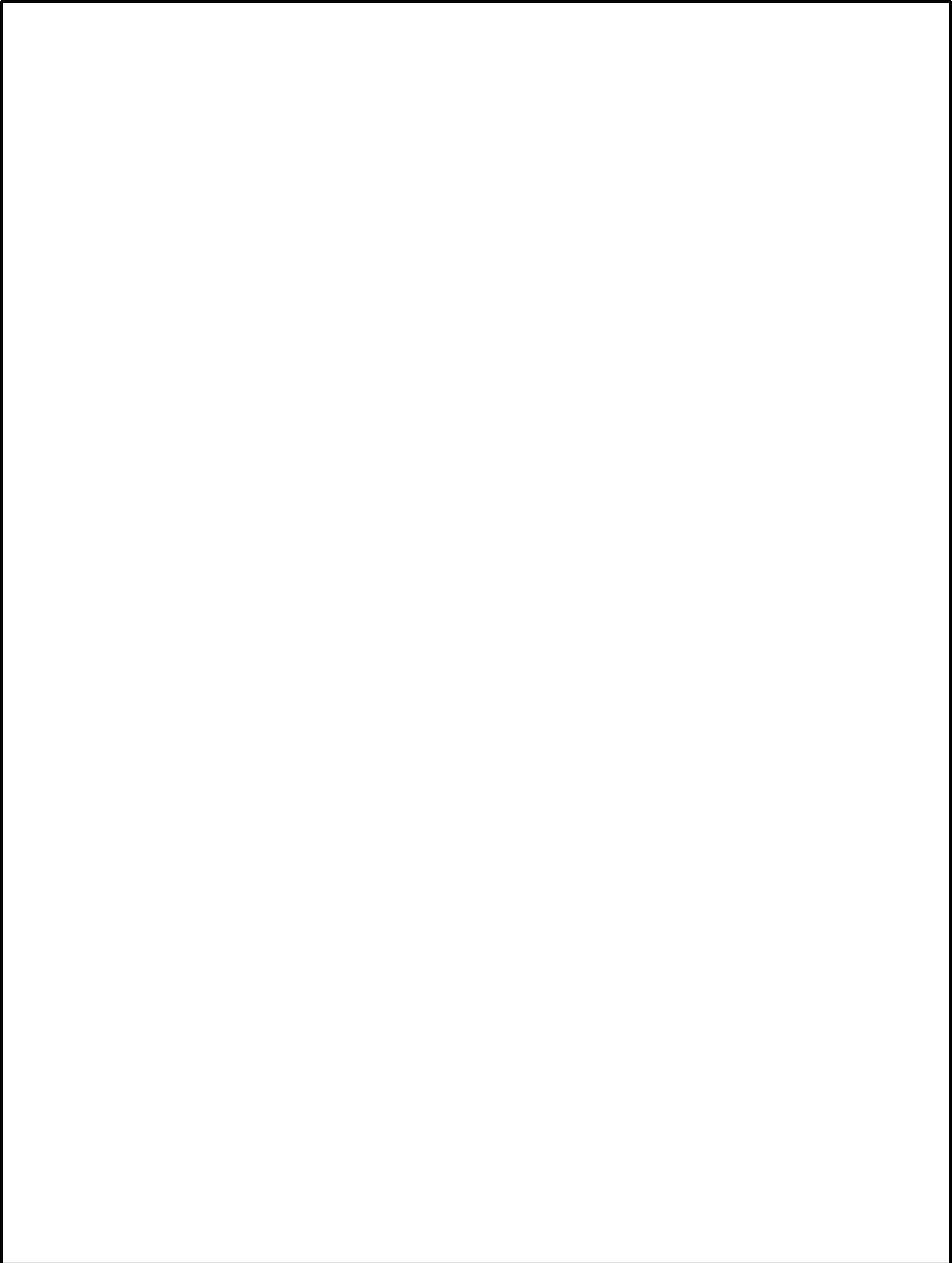
Загальна ж маса половини кильової трубки:

$$m_{\text{тр.}} = L \cdot m_{\text{м.тр.}} = 2.130 \cdot 0.357 = 0.76, \text{кг} ;$$

Як для частини несучої конструкції результат не поганий.

Для ресори довжиною 1,2 м (з яких 0,1 м – жорстке защемлення в центрі) та висотою відхилення кінця 0,125 м:

- 1) Визначити види та величини максимальних експлуатаційних навантажень,
- 2) Запропонувати пакет композиту відповідно до природи навантажень,
- 3) Обрати метод та провести перевірку моделі на збереження міцності,
- 4) Виконати порівняльну характеристику спроектованої композитної ресори з відповідною ресорою, що виконана зі сталі,
- 5) Вибрати технологію виготовлення композиту та описати технологічний процес.



					КР.134.4161.03.ПЗ.02						
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата							
Студент		Сергунін І.О.				Проектування композитного стрижня		Літ.	Аркуш	Аркушів	
Керівник		Соломонбк Н.С							13		
Консульт.								НУК ім. адмірала Макарова			
Н. Контр.		Захарова І.О.									
Зав. каф.		Коростильов Л.І.									

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ КОМПОЗИТНОЇ ТРУБКИ

2.1 Вибір компонентів композитного матеріалу

2.1.1 Принциповий вибір наповнювача.

Щоб провести порівняльний аналіз волокон для композитного матеріалу трубки рами дельтаплану, розглянемо такі фактори, як вага, жорсткість, міцність, стійкість до зовнішнього середовища та легкість використання для кожного з волокон: вуглеволокно, скловолокно, кевлар та борне волокно.

1. Вага

- Вуглеволокно (Carbon Fiber): Одне з найлегших серед представлених, поступаючись тільки кевлару. Його щільність становить приблизно 1.6 г/см^3 .
- Скловолокно (Glass Fiber): Скловолокно важче за вуглеволокно, з щільністю близько 2.5 г/см^3 .
- Кевлар (Kevlar): Кевлар має низьку щільність, приблизно 1.44 г/см^3 , що робить його найлегшим матеріалом у вибірці.
- Борне волокно (Boron Fiber): Борне волокно є важчим за вуглеволокно та кевлар, щільність становить близько 2.6 г/см^3 .

2. Жорсткість

- Вуглеволокно: Максимально сприятливі властивості жорсткості та міцності наповнених композитів, враховуючи їх низьку вагу. Велика варіативність дозволяє підібрати необхідну комбінацію цих характеристик.
- Скловолокно: Готові композити, мають чудові фізико механічні характеристики, які дещо поступаються іншим волокнам.
- Кевлар: Має високу стійкість на розтягнення, але меншу жорсткість порівняно з вуглеволокном.
- Борне волокно: Забезпечує найкращу жорсткість через високий модуль пружності, кращий за інші волокна у цьому параметрі.

3. Стійкість до зовнішнього середовища

- Вуглеволокно: Дуже стійке до корозії та дії хімічних речовин.
- Скловолокно: Стійке до корозії, але може деградувати під дією ультрафіолету.
- Кевлар: Стійкий до корозії та дії хімічних речовин, але чутливий до ультрафіолетового випромінювання.
- Борне волокно: Стійке до корозії, але чутливе до деяких хімічних речовин і ультрафіолету.

4. Легкість використання

- Вуглеволокно: Легко формується, але потребує особливих умов обробки та захисту під час роботи з ним.
- Скловолокно: Відносно легко обробляється, широко використовується у багатьох галузях.
- Кевлар: Важко обробляється через високу міцність, потребує спеціального обладнання.
- Борне волокно: Трудно обробляється, потребує спеціального обладнання та обережності при роботі.

Таблиця 2.1 - Порівняння різних волокон.

Фактор	Вуглеволокно	Скловолокно	Кевлар	Борне волокно
Щільність, кг/м ³	1750-1900	2500-2600	1380-1440	2500
Модуль пружності, ГПа	230-600	70-85	70-125	400-450
Міцність на розтяг	3500-6000	2000-3500	3000-3600	3000-4000
Стійкість до зовнішнього середовища	Висока	Добра	Середня	Висока
Легкість	Середня	Легка	Складна	Дуже складна

Фактор	Вуглеволокно	Скловолокно	Кевлар	Борне волокно
використання				

Тому підсумовуючи результати:

Критеріями є мінімізація ваги та забезпечення достатньої жорсткості.

1)Кевлар – найлегший, але більш підходить для гнучких конструкцій з протидією розтягнення .

2)Борне волокно має кращі ФМВ, але досить важке та складне в обробці.

3)Скловолокно важче за кевлар та вуглеволокно, та не має достатньої міцності.

Вуглеволокно виявляється ідеальним кандидатом, так як може надати конструкції чудову жорсткість , при цьому досить легке та не потребує дуже спеціальних умов при вкладанні. А його ціна задовольняє його властивостям.

2.1.2 Принциповий вибір матриці.

Порівняльний аналіз смол для композитного матеріалу трубки рами дельтаплану

Розглянемо три види смол: епоксидну, поліефірну та фенол-формальдегідну, враховуючи наступні фактори: вага, стійкість на вигин, стійкість до зовнішнього середовища, легкість використання та ціна.

1. Вага

- Епоксидна (Ероху): Легка, щільність становить близько 1.2 г/см³.
- Поліефірна (Polyester): Середньої ваги, щільність близько 1.2-1.5 г/см³.
- Фенол-формальдегідна (Phenol-Formaldehyde): Трохи важча, щільність близько 1.2-1.3 г/см³.

2. Стійкість на вигин

- Епоксидна: Має високу стійкість на вигин і хорошу адгезію до вуглеволокна, забезпечуючи високу міцність композиту.
- Поліефірна: Стійкість на вигин нижча, ніж у епоксидної, але все ще прийнятна для багатьох застосувань.
- Фенол-формальдегідна: Має хорошу стійкість на вигин, але зазвичай нижчу, ніж у епоксидних смол.

3. Стійкість до зовнішнього середовища

- Епоксидна: Дуже стійка до вологи, хімічних речовин та ультрафіолету.
- Поліефірна: Менш стійка до вологи та хімічних речовин порівняно з епоксидною, може жовтіти на сонці.
- Фенол-формальдегідна: Дуже стійка до високих температур та хімічних речовин, але може мати обмежену стійкість до вологи.

4. Легкість використання

- Епоксидна: Потребує точного змішування і дотримання технологічного процесу, вимагає більше часу для затвердіння.
- Поліефірна: Легша у використанні, швидше твердне і має ширше застосування у різних умовах.
- Фенол-формальдегідна: Потребує специфічних умов обробки, таких як висока температура та тиск, що ускладнює процес виробництва.

5. Ціна

- Епоксидна: Дорога, але ціна виправдана високою якістю та властивостями.
- Поліефірна: Найдешевша з розглянутих смол, що робить її популярною для менш критичних застосувань.
- Фенол-формальдегідна: Ціна середня, але може бути дорожчою через вимоги до обробки.

Підсумок

Табл. 2.2 Порівняння різних смол

Фактор	Епоксидна	Поліефірна	Фенол-формальдегідна
Вага	Легка	Середня	Середня
Стійкість на вигин	Висока	Середня	Середня
Стійкість до зовнішнього середовища	Висока	Низька	Висока
Легкість використання	Середня	Легка	Складна

Фактор	Епоксидна	Поліефірна	Фенол-формальдегідна
Ціна	Дорога	Дешевша	Середня

Епоксидна смола: Найкращий вибір для високоякісних композитів, оскільки забезпечує високу міцність та стійкість до зовнішніх впливів, хоч і є дорогою та складною в обробці.

2.2 Вибір технології виготовлення композитних трубок

Перед тим як почати аналіз існуючих технологій встановимо фактори оцінювання:

- Гарантія якості виробів: виготовлена трубки повинні мати задовільні властивості, які не будуть відрізнятися залежно від партії
- Устаткування: доцільність використання дорогого обладнання повинна бути обов'язково обґрунтована
- Кількість операцій: велика кількість виробничих процесів ускладнює дотримання відповідних норм на кожному з них, що може підвищити кількість дефектів, та знизити ступінь автоматизації.
- Ступінь автоматизації: можливість частково або повністю автоматизувати виробництво, що знижує виробничі затрати
- Економічна ефективність.
- Специфічність сировини яка використовується для цього процесу

Існує 5 відомих та добре описаних методів формування карбонових трубок.

Труби з вуглецевого волокна мають різноманітне застосування в різних галузях промисловості. Порожня частина вуглецевого композитного матеріалу є одним із найміцніших матеріалів, незважаючи на малу вагу. Вони мають особливу перевагу у співвідношенні міцності до ваги. Для виготовлення труб з вуглецевого волокна використовується кілька технологій, кожна з яких має свої переваги та обмеження. У багатьох випадках виробничий процес визначає якість труб і їх промислове призначення.

Пультрузія

Пультрузія - це безперервний виробничий процес, який використовується для виробництва труб з вуглецевого волокна постійного поперечного перерізу. У цьому методі ровінги з вуглецевого волокна (пучки вуглецевих ниток 1 рис 2.2.1) насичуються смолою 2 та протягуються через нагріту матрицю 3

					КР.134.4161.03.ПЗ.02	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Матриця надає бажану форму труби, а також затверджує смолу. Коли композит з вуглецевого волокна проходить через матрицю, він тягнеться безперервним механізмом витягування 4. Отримана труба має рівномірний переріз і відмінні міцнісні властивості. Пультрузійні труби з вуглецевого волокна часто використовуються в конструкціях.

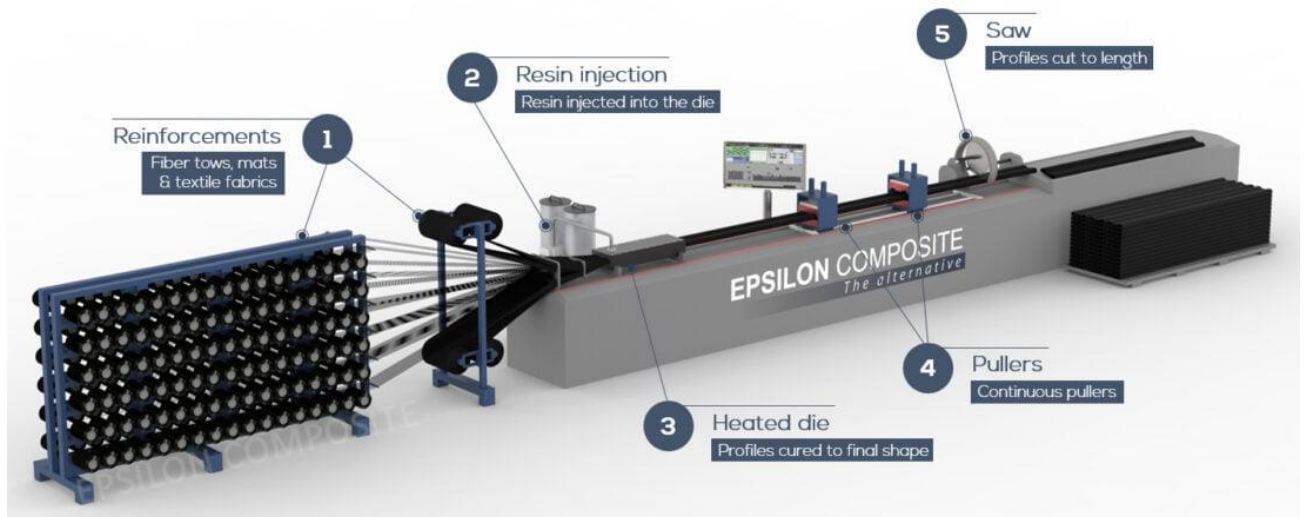


Рис. 2.1 Пультрузійне виготовлення карбонових трубок

Рулонне обгортання

Рулонне обгортання — це техніка, при якій листи препрегу з вуглецевого волокна (тканина з вуглецевого волокна, попередньо просочена смолою) обертаються навколо оправки у формі спіралі. Листи препрегу нарізають на смуги і накладають шар за шаром, при цьому кожен шар трохи накладає на попередній. Оправку можна обертати або переміщувати лінійно під час процесу обгортання, щоб отримати бажану форму труби. Після завершення обгортання трубку затвердіють у печі для затвердіння смоли. Рулонна упаковка забезпечує гнучкість орієнтації волокон і підходить для невеликого виробництва. Труби препрегу з вуглецевого волокна доступні в круглих і квадратних структурах.



Рис 2.2 Рулонне обгортання препрегу

Намотування нитки

Намотування нитки є популярним способом виготовлення труб з вуглецевого волокна. У цій техніці нитки вуглецевого волокна намотуються навколо обертової оправки за точним малюнком. В процесі намотування нитки просочуються епоксидною смолою. Оправлення може бути конічним або прямим залежно від бажаної форми труби. Після намотування трубку затверджують у духовці, щоб смола затверділа, а потім оправку видаляють. Намотування нитки дозволяє точно контролювати орієнтацію волокон і забезпечує високе співвідношення міцності до ваги.

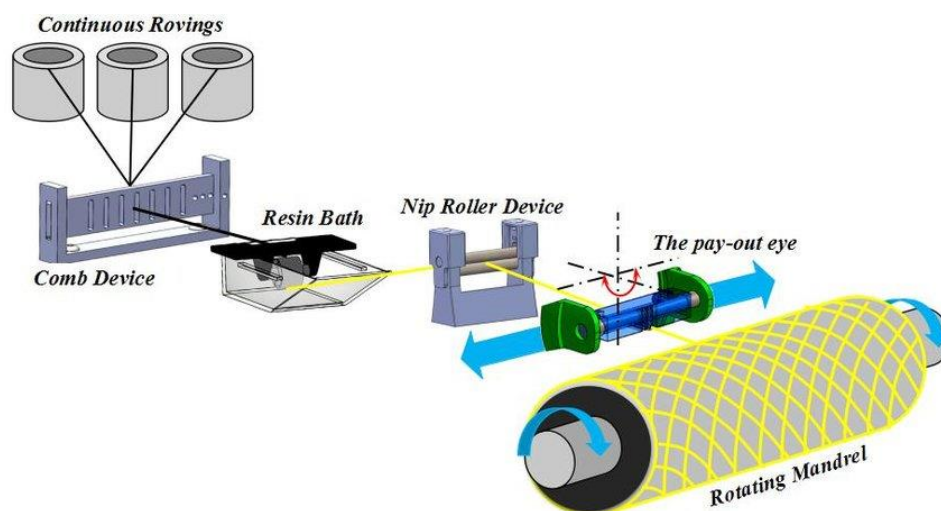


Рис. 2.3 Метод виготовлення вуглецевих трубок намотування нитки

Вакуумна інфузія

Інфузія смоли, також відома як вакуумна інфузія, — це метод, за якого сухі тканини або преформи з вуглецевого волокна поміщають у форму, а смола вливається в тканину під тиском вакууму. Суху тканину з вуглецевого волокна спочатку поміщають у прес-форму, а потім накладають вакуумний мішок для ущільнення. Смола вводиться у форму під вакуумом, що дозволяє їй текти та просочувати вуглецеві волокна. Просочену смолою частину потім твердіють при кімнатній температурі або в духовці. Вливання смоли — це універсальний метод, який дозволяє виготовляти складні форми з контрольованим вмістом смоли та підходить для великомасштабного виробництва.

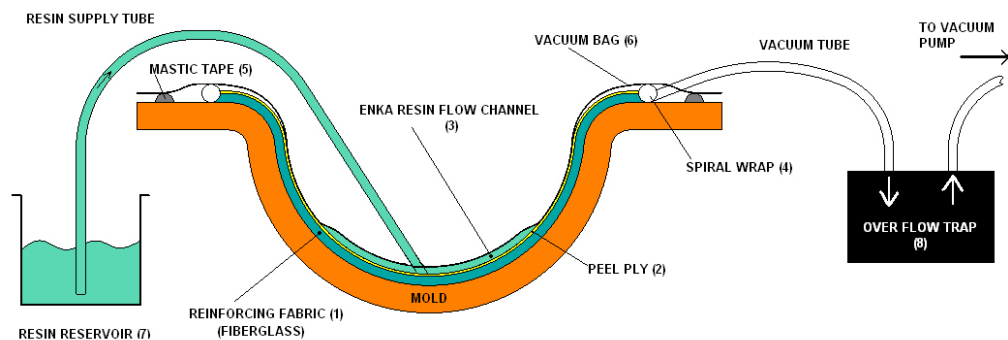


Рис. 2.4 Метод інфузії

З використанням заготовлених рукавів з вуглецевого волокна.

Спочатку відбувається натягування рукава рис 3.5 а на трубу, при чому труба може бути змінного діаметру рис 3.5 б, так як рукав може змінювати діаметр при його витягуванні. Трубку з натягнутим рукавом фіксують у спеціальному станку,



а)



б)

Рис 2.5 а)Рукав з карбонового волокну; б) Приклад труби змінного діаметру

Табл. 2.2 Порівняння технології виробництва для заданої задачі.

Технологія	Переваги	Недоліки
Пультрузія	Найвища швидкість виробництва з усіх представлених. Гарна якість трубок. Повністю автоматизований процес	Якщо довжину змінювати легко, то забезпечити варіативність діаметрів важко. Дороге обладнання.
Рулонне обгортання	Можна робити в ручну. Діаметр залежить тільки від матриці, що забезпечує варіативність.	Без автоматизації якість трубок залежить від кваліфікації робітників. Препрег коштує дорожче окремих його частин. Важко виготовляти довгі трубки
Намотування нитки	Найвищий контроль ФМВ через варіативність намотки.	Швидкість нижча ніж в пультрузії, але обладнання

Технологія	Переваги	Недоліки
	Повністю автоматизований. Повна варіативність діаметрів та довжин трубок.	не таке дороге. Потребує додаткових розрахунків
Вакуумна інфузія	Створення трубок різних діаметрів і форм. Гарна якість виробів	Низька ефективність процесу. Важкість повної автоматизації
Натягування рукава	Легкість операцій, можливість ручного та автоматичного вкладання. Варіативність діаметрів та довжин.	Рукав – це досить специфічна сировина, коштує дорожче за нитки або ткани. Необхідність закупівлі рукавів різних діаметрів.

Враховуючи, що трубки для дельтапланів потрібні різного розміру та довжини, то пультрузія хоч і потребує складного обладнання, та скоріш за все трубки різного діаметру важко виробляти на одному станку, але за швидкість виготовлення та якість отриманих виробів я вважаю цей метод оптимальним.

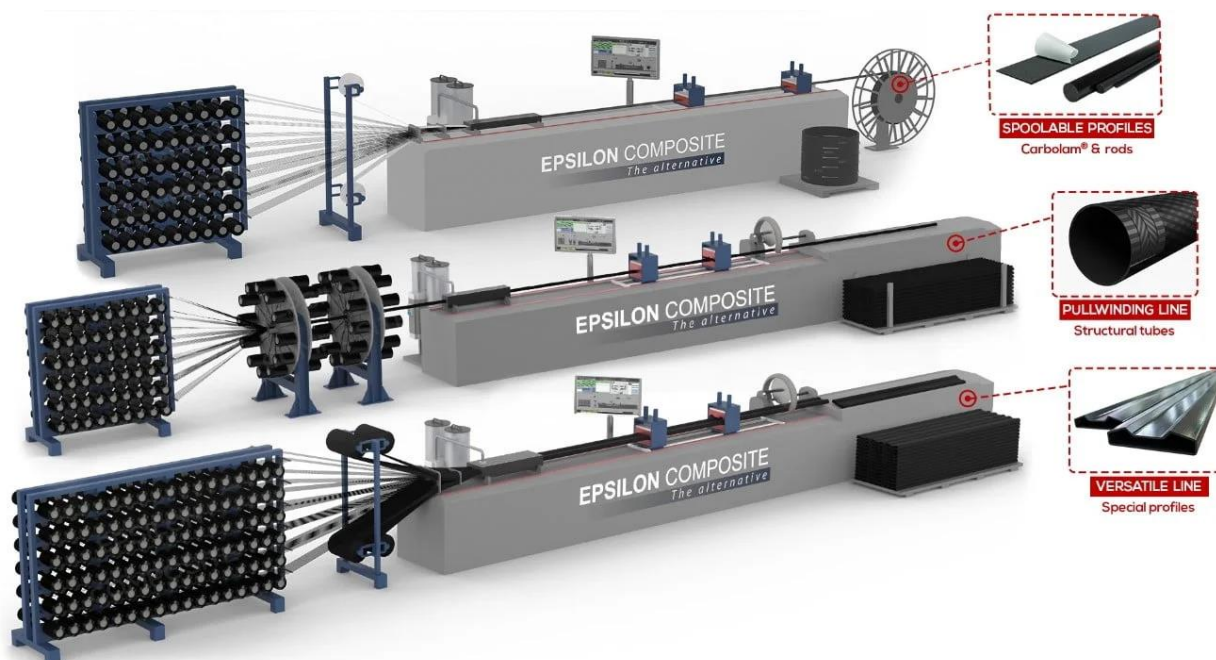


Рис. 2.6 Різні види намотування при пультрузії

На рисунку 4.1 зображені різновиди технології виробництва вуглецевих трубок методом пультрузії (зверху вниз)

- Одно напрямне намотування для профілів які можна намотувати: стрічки, троси.)
- Намотування з перехресним вкладанням ниток: трубки з поперечним армуванням можна виготовити з потрібними анізотропними властивостями.
- Виготовлення профілів різних форм, які відрізняються від трубчатих, та можуть бути несиметричними в перерізі.

Так як в рамі дельтаплана трубки витримують різноманітні навантаження, то ідеальними буде пультрузія з перехресним вкладанням, так як регулювання кутів перехрещення дозволяє досягнути бажаних властивостей.

2.3 Кінцевий вибір вуглеволокна та смоли.

При виборі вуглеволокна слід пам'ятати, що воно існує низько модульних та високо модульних модифікаціях. Коротко розглянемо в наступній таблиці.

Табл. 2.3 Залежність механічних властивостей волокна від його модульності.

	Низько модульні	Середньо модульні	Високо модульні
Модуль пружності, ГПа	205-235	275-310	345-550
Міцність на розтяг, МПа	3450 - 4650	4350 - 6900	1860 - 4140
Відносне залишкове подовження, %	1.4 – 1.6	1.6 – 2.2	0.81 – 0.9
Густина, г/см ³	1.76 – 1.791	1.76 – 1.79	1.87

Причому високо модульні вуглецеві волокна доцільно використовувати в конструкціях, які потребують максимальної жорсткості та мінімальної гнучкості,

так як низько модульні мають зворотні властивості, вони краще більш гнучкі та конструкція буде не така жорстка.

Тут же слід зберігати баланс жорсткості та гнучкості, тому я вважаю середньо модульні волокна найкращим рішенням.

Вибране волокно: Враховуючи критерій мінімальної ваги, та забезпечення достатньої жорсткості зупинимось на середньо модульному волокні.

Уточнений варіант виходячи з розрахунку приведеного в наступному розділі та технології.



Рис. 2.7 Не прошитий ровінг C T50-4.8/280

Не прошитий ровінг являє собою гарний матеріал для пултрузії, потребує контролю натяжки, але дозволяє отримувати наповнені композити с чудовими ФМ-характеристиками

Табл. 2.4 Характеристик ровінгу C T50-4.8/280

Параметр	Позначення, е.в.	Вуглеволокно
Модуль пружності	E , ГПа	280
Міцність на розтяг	σ_p , МПа	4800
Міцність на стискання	σ_c , МПа	2880
Максимальні дотичні напруження	τ , МПа	1200

Параметр	Позначення, е.в.	Вуглеволокно
Модуль зсуву	G, ГПа	115,70
Коеф. Пуасона	μ , ГПа	0,21
Кількість філаментів	-	50k
Товщина окремих волокон	,мкм	6,6
Товщина шару, 1к	t, мм	0,185
Ширина ровінгу	мм	0,185x50=9,25
Максимальне подовження до руйнації	ε , %	1.65

Кінцевий вибір епоксидної смоли.

Вимоги до матеріалу

- Механічні властивості: Максимально висока міцність на розтягнення, стискання і вигин.
- Термостійкість: Дельтаплан піддається впливу різних температур, включаючи низькі температури на великих висотах і високі температури на землі.
- Вібрації та ударостійкість: Важливо, щоб смола забезпечувала стійкість до вібрацій і ударів.

2. Характеристики Смоли

- Низька в'язкість: Забезпечує легке просочування вуглецевого волокна.
- Швидкість затвердіння: Має бути достатньою для виробничого процесу, але не занадто швидкою, щоб уникнути дефектів.
- Температура експлуатації: Смола повинна бути стабільною низьких температурах.

Вибрана смола та затверджувач:

RTM&W RT2712 з затверджувачем Part B3: Добре підходить для вуглецевих волокон, забезпечує високу міцність і термостійкість. Швидкість гелюутворення 5 хв ідеально підходить для тонкостінних елементів

Високоєфективні, високоміцні матеріали отримують, коли цю смолу затвердіють за допомогою а різноманітність затверджувачів. Ненаповнені системи загального користування мають показники міцності на розтяг більше ніж 69 МПа зі значеннями модуля більше 2750 МПа. Такі системи зазвичай дуже жорсткі

2.4 Розрахунок міцності окремих односпрямованих шарів

У розрахунку оцінено доцільність заміни матеріалу шарів 45° на високоміцне скловолокно, так як основне навантаження будуть витримувати k - кількість шарів з карбонопластику розташованих вздовж труби

Хід розрахунку

Запишемо дані у таблицю 2.5.

Табл.2.5 Необхідні для розрахунку ФМВ вугле- та скловолокон та епоксидної матриці

Параметр	Позначення, е.в.	Епоксидна матриця	Вуглеволокно	Скловолокно
Модуль пружності	E , ГПа	3,35	280	93
Міцність на розтяг	σ_p , МПа	75	4800	2000
Міцність на стискання	σ_c , МПа	110	2880	1000
Максимальні дотичні	τ , МПа	46,25	1200	480

Параметр	Позначення, є.в.	Епоксидна матриця	Вуглеволокно	Скловолокно
напруження				
Модуль зсуву	G, ГПа	1,24	115,70	37,20
Коеф. Пуасона	μ , ГПа	0,35	0,21	0,25

1) Визначимо міцність КМ на розтягування вздовж волокон за формулою:

$$F_{1p} = \frac{\sigma_{Mp}}{E_M} [E_B \psi + E_M (1 - \psi)], \quad \text{при } \frac{\sigma_{Mp}}{E_M} < \frac{\sigma_{Bp}}{E_B} \quad \text{ф2.4.1 ;}$$

$$F_{1p} = \frac{\sigma_{Bp}}{E_B} [E_B \psi + E_M (1 - \psi)], \quad \text{при } \frac{\sigma_{Mp}}{E_M} \geq \frac{\sigma_{Bp}}{E_B} \quad \text{ф2.4.2 ;}$$

Обиране вуглецеве високо-модульне волокно порівнюємо з скляним високоміцним, розглядаючи варіант використання другого в шарах $\pm 45^\circ$ Матриця епоксидна.

Визначаємо розрахункові формули.

$$\frac{\sigma_{Mp}}{E_M} = \frac{75}{3350} = 0,0224 ; \quad \frac{\sigma_{Bp.y}}{E_{B.y}} = \frac{4800}{280\,000} = 0,017 ;$$

$$\frac{\sigma_{Bp.скл}}{E_{B.кев}} = \frac{2\,000}{93\,000} = 0,022 ;$$

Для обох випадків 2.4.2

Ступінь наповнення візьмемо як 0.7 (70%)

$$F_{1p.y} = \frac{4800}{280\,000} [280\,000 \cdot 0.7 + 4000(1 - 0.7)] = 3377 \text{ (МПа)} ;$$

$$F_{1p.скл} = \frac{2\,000}{93\,000} [93\,000 \cdot 0.7 + 4000(1 - 0.7)] = 1422 \text{ (МПа)}.$$

2) Визначимо міцність КМ на стискання вздовж волокон:

$$F_{1c} = \frac{\sigma_{Mc}}{E_M} [E_B \psi + E_M (1 - \psi)], \quad \text{при } \frac{\sigma_{Mc}}{E_M} < \frac{\sigma_{Bc}}{E_B} \quad \text{ф2.4.3 ;}$$

$$F_{1c} = \frac{\sigma_{Bc}}{E_B} [E_B \psi + E_M (1 - \psi)], \quad \text{при } \frac{\sigma_{Mc}}{E_M} \geq \frac{\sigma_{Bc}}{E_B} \quad \text{ф2.4.4 ;}$$

Визначаємо розрахункову формулу.

$$\frac{\sigma_{Mc}}{E_M} = \frac{110}{3350} = 0,033; \quad \frac{\sigma_{Bc.y}}{E_{B.y}} = \frac{2880}{280\,000} = 0,01; \quad \frac{\sigma_{Bc.скл}}{E_{Bc.скл}} = \frac{1000}{93\,000} = 0,011;$$

Для обох ф2.4.4

$$F_{1c.y} = \frac{2880}{280\,000} [280\,000 \cdot 0.7 + 3350(1 - 0.7)] = 2026 (\text{МПа});$$

$$F_{1c.скл} = \frac{1000}{93000} [93\,000 \cdot 0.7 + 3350(1 - 0.7)] = 719 (\text{МПа}).$$

3) Визначимо міцність КМ на розтягування поперек волокон:

$$F_{2p} = \sigma_{Mp} E_2 \left[\frac{2R}{t} \left(\frac{1}{E_B} - \frac{1}{E_M} \right) + \frac{1}{E_M} \right], \quad \frac{2R}{t} = \psi$$

$$E_2 = \frac{E_B E_M}{\psi E_M + (1 - \psi) E_B}$$

$$E_{2.y} = \frac{280\,000 \cdot 3350}{0,7 \cdot 3350 + (1 - 0,7) 280\,000} = 10\,863 (\text{МПа});$$

$$E_{2.скл} = \frac{93\,000 \cdot 4\,000}{0,7 \cdot 3350 + (1 - 0,7) 93\,000} = 10\,301 (\text{МПа});$$

$$F_{2p.y} = 75 \cdot 12\,931,03 \left[0,7 \left(\frac{1}{300\,000} - \frac{1}{3350} \right) + \frac{1}{3350} \right] = 75 (\text{МПа});$$

$$F_{2p.скл} = 10\,301 \cdot 75 \left[0,7 \left(\frac{1}{93\,000} - \frac{1}{3350} \right) + \frac{1}{3350} \right] = 75 (\text{МПа}).$$

4) Визначимо міцність КМ на стискання поперек волокон:

$$F_{2c} = F_{2p} \frac{\sigma_{Mc}}{\sigma_{Mp}};$$

$$F_{2c.y} = 75 \frac{110}{75} = 110 (\text{МПа});$$

$$F_{2c.скл} = 75 \frac{110}{75} = 110 (\text{МПа}).$$

5) Визначимо міцність КМ на зсув:

$$F_{12} = \frac{\tau_M}{G_M} G_{12}, \quad \text{при } \frac{\tau_M}{G_M} < \frac{\tau_B}{G_B} \text{ ф2.4.5;}$$

$$F_{12} = \frac{\tau_B}{G_B} G_{12}, \quad \text{при } \frac{\tau_M}{G_M} \geq \frac{\tau_B}{G_B} \text{ ф2.4.6;}$$

$$\frac{\tau_M}{G_M} = 0,029 ; \frac{\tau_y}{G_y} = 0,01 ; \frac{\tau_{\text{СКЛ}}}{G_{\text{СКЛ}}} = 0,013;$$

Для скловолокна та для вуглеволокна ф2.4.6 .

$$G_{12,y} = \frac{G_M G_y}{\psi G_M + (1 - \psi) G_y} = 4035 \text{ (МПа)} ;$$

$$F_{12,y} = \frac{\tau_y}{G_y} G_{12,y} = 41,85 \text{ (МПа)};$$

$$G_{12,\text{СКЛ}} = \frac{G_M G_{\text{кев}}}{\psi G_M + (1 - \psi) G_{\text{СКЛ}}} = 3837 \text{ (МПа)} ;$$

$$F_{12,\text{СКЛ}} = \frac{\tau_{\text{СКЛ}}}{G_{\text{СКЛ}}} G_{12,\text{СКЛ}} = 49,51 \text{ (МПа)}.$$

Табл.2.6 Розраховані характеристики однонапрямних композитів

Параметр	Епоксидний вуглепластик	Епоксидний склопластик
σ_{1p} (МПа)	3377	1422
σ_{1c} (МПа)	2026	719
σ_{2p} (МПа)	75	75
σ_{2c} (МПа)	110	110
τ_{12} (МПа)	41,85	49,51

2.5 Розрахунок та вибір композитного пакету

Креслення дельтаплану представлено рис 1.2, для розрахунку візьмемо найбільш напружені елементи – бокові балки.

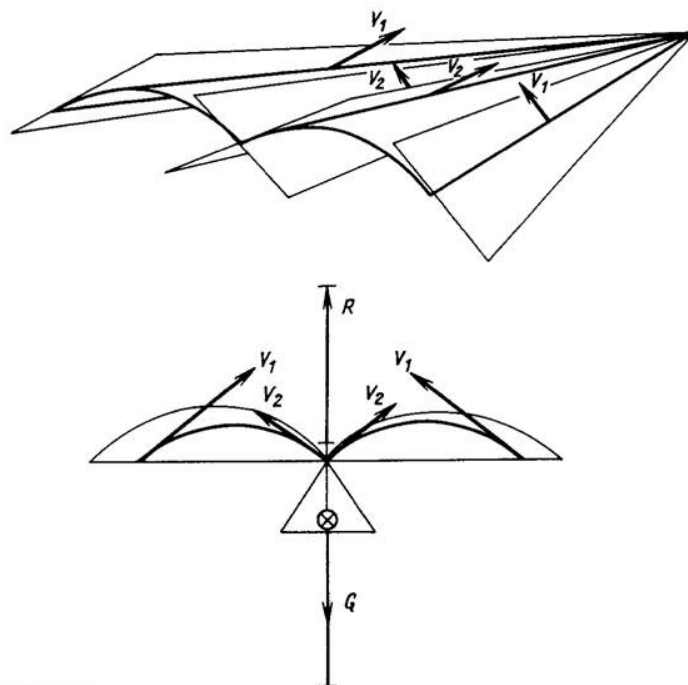


Рис.2.8 Схема результируючих навантажень на бокові балки та киль.

На рис1.1 зазначені вектори v_1 , v_2 – які є проекцією результируючих навантажень на бокові балки і на киль відповідно.

R – підйомна сила ; G – сила тяжіння – які відповідно є головними діючими силами

Знехтуючи навантаженнями на кильову балку отримуємо навантаження, на бокових балках, які приблизно дорівнюють половині від сили тяжіння на кожну з них рис 2.5.2 .

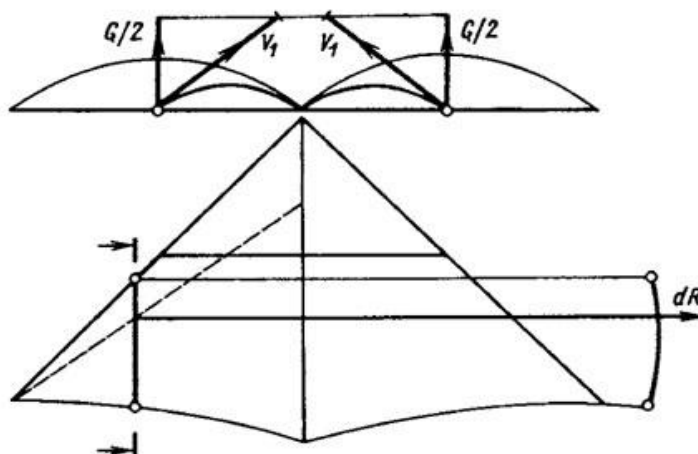


Рис. 2.9 Розподіл діючих сил на бічні балки

Побудова епюр зовнішніх навантажень:

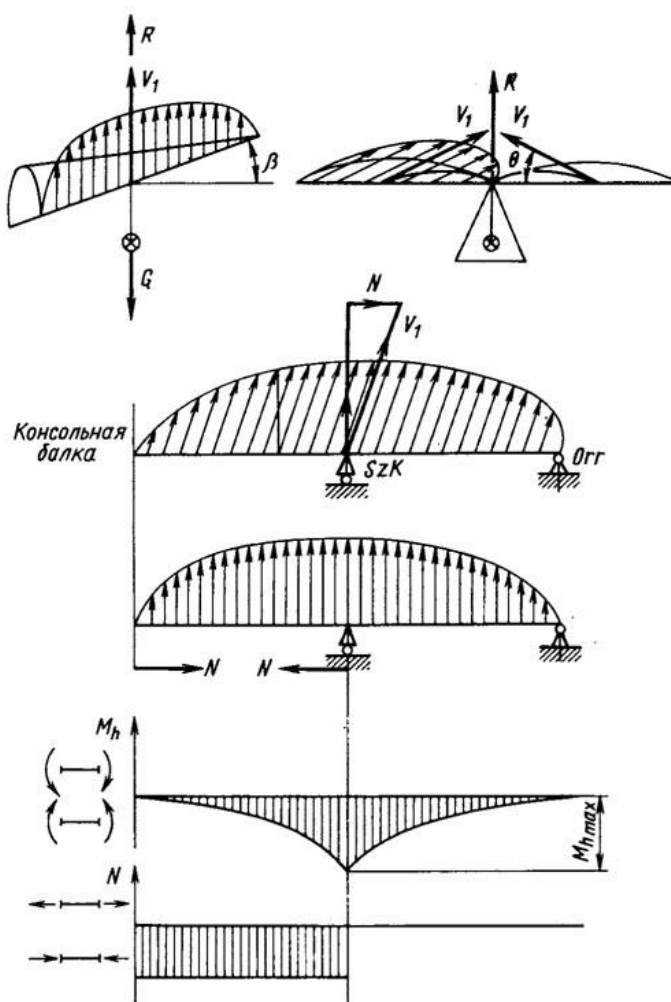


Рис2.10 Епюри зовнішніх навантажень.

Бічна балка є довгим тонкостінним стрижнем, шарнірно закріпленим у боковому вузлі та носовій частині. Сили, що виникають у куполі, передають навантаження на балку у вигляді системи розподілених сил. Вектор сумарної сили V цієї системи нахилений вперед під кутом γ відносно осі балки. Його можна визначити за кутом нахилу β між площиною балки крила та горизонтальною площиною, а також за кутом θ між вектором сумарного навантаження та поперечною балкою. Нахил вектора V_1 показує, що розподілене навантаження спрямоване не перпендикулярно до балки крила.

Хоча сила тертя між куполом і балкою здебільшого врівноважується осьовою складовою розподіленого навантаження, купол все ж навантажує кінець крилової балки зосередженою силою N . Сумарне розподілене навантаження проходить через вузол SzK , тому в носовій частині не виникає врівноважуючої сили.

Основою розрахунків є згинальний момент M_h . На рис. 2.5.1 показано, що найбільше навантаження створює момент M_{hmax} , який виникає у вузлі SzK . Для його зменшення застосовуються аутригери.

Визначення небезпечних перерізів конструкції та їх небезпечних точок.

Під час польоту найчастіше ламається бічна балка, особливо в місці її з'єднання з поперечною балкою (вузол SzK). З точки зору повторюваності, такі поломки є найбільш частими й зазвичай спричиняють вигин поперечної балки. Усі інші поломки трапляються через неправильну експлуатацію, транспортування та контролю.

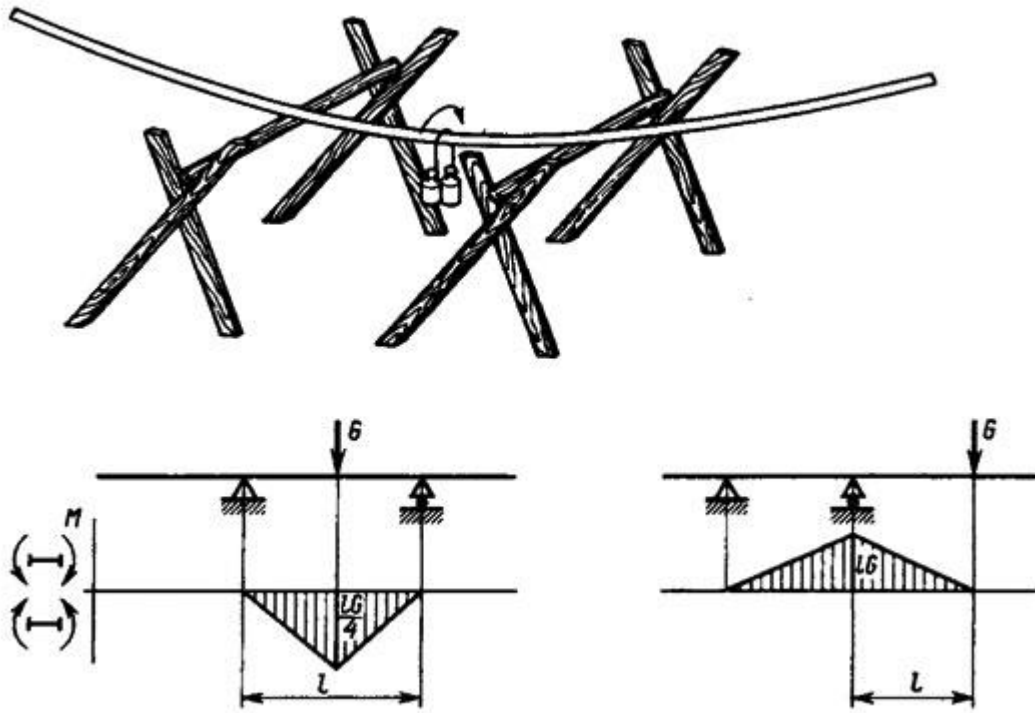


Рис.2.11 класичні випробування стрижня

4)Приведемо розрахунок:

Вхідні дані :

Стрижень опертий на 2 дві шарнірно не рухливі з відстанню між ними $l = 0.7$ м та діаметром $d=0,042$ м , до якого по середні направлена сила Q , при чому її значення

$$Q = \frac{G}{2} \cdot 1.7 = 115 \cdot \frac{10}{2} \cdot 1.7 \approx 1 \text{ кН}; \text{ ф2.5.1}$$

Де $G = 115$ кг максимальна льотна вага.

Матеріал має наступні параметри:

$$E_1 = 1.972 \cdot 10^5 (\text{МПа}); E_2 = 1.086 \cdot 10^4 (\text{МПа});$$

$$\nu_{12} = 0.014; \nu_{21} = 0.21$$

$$t_0 = 0.185 \cdot 10^{-3} \text{ м}; t_{45} = 0.185 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Умови рівноваги для кінців балки

Лівий : $u = 0; v = 0; M = 0$.

Правий : $N=0$; $v=0$; $M=0$.

У цьому випадку

$$P = Q_x = M_y = M_z = 0$$

$$Q_y = -Q; M_x = \frac{Q}{2}z, \text{ для } 0 \leq z < \frac{l}{2} \quad \Phi 2.5.2;$$

$$M_{x\max} = \frac{Q}{2} \cdot \frac{l}{2} = \frac{Ql}{4} = 175 \text{ Н};$$

Розрахуємо жорсткість стінки (контур вважається жорстким)

$$B = B_{11} = \sum_{i=1}^k h_i \left[\bar{E}_i^{(i)} \cos^4 \varphi_i + \bar{E}_2^{(i)} \sin^4 \varphi_i + 2 * (\bar{E}_1^{(i)} \nu_{12}^{(i)} + 2G_{12}^{(i)}) \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i \right]$$

$$= 36,45k + 21,49(\text{МПа}) \quad \Phi 2.5.3;$$

$$C = B_{33} = \sum_{i=1}^k h_i \left[(\bar{E}_1^{(i)} + \bar{E}_2^{(i)} - 2\bar{E}_1^{(i)} \nu_{12}^{(i)} + 2G_{12}^{(i)}) \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i + 2G_{12}^{(i)} \cos^2 \varphi_i \right]$$

$$= 36,45k + 16,96(\text{МПа}) \quad \Phi 2.5.4;$$

У стінці та повздовжніх елементах зусилля будуть:

$$N_z = B \frac{M_x}{D_x} y \quad \Phi 2.5.5;$$

$$D_x = \oint B y^2 ds + \sum_{j=1}^{12} E_p F_p y_j^2 = B R^3 \int_0^{2\pi} \cos^2 \beta d\beta + E_p R^3 \sum_{j=1}^{12} \cos^2 \beta_j =$$

$$= 1.061k + 0.625(\text{КПа}) \quad \Phi 2.5.6;$$

$$N_z = B \frac{M_x}{D_x} y = (36.48k + 21.78) \cdot \frac{\frac{4 \cdot 10^{-3}}{2} z \cdot 10^{-3}}{(1.061k + 0.633) \cdot 10^{-3}} \cos \beta_j (\text{МПа})$$

Максимальні значення напружень реалізуються в перерізі $z=l/2$

$$\sigma_j = E_p \frac{M_x}{D_x} y_j \quad \Phi 2.5.7;;$$

$$\sigma_{j\max} = 197\,000 \cdot \frac{0.042}{2} \frac{0.175 \cdot 10^{-3}}{(1.061k + 0.633) \cdot 10^{-3}} \approx 1144 - 441k (\text{МПа});$$

Функція sx розраховується за ділянками. Початок у точці 1. Оскільки переріз симетричний розглядаємо його половину.

$$s_x = BR^2 \sin \beta \quad \Phi 2.5.8;$$

$$s_{x\max} = 9.478 + 16.073k \text{ (КПа)};$$

Визначення деформацій:

$$e_z = \theta'_x y = \frac{M_x}{D_x} y = \frac{\frac{Q}{2} z d}{D_x} \cos \beta \quad \Phi 2.5.9;$$

$$e_{zs} = \frac{Q s_x(s)}{D_x C} \quad \Phi 2.5.10;$$

Найбільш небезпечний переріз

$$e_z = \frac{0.175 \cdot 10^3}{(1.061k + 0.633) \cdot 10^3} \frac{0.042}{2} = \frac{0.12}{(1.061k + 0.625)} \cdot 10^{-3}$$

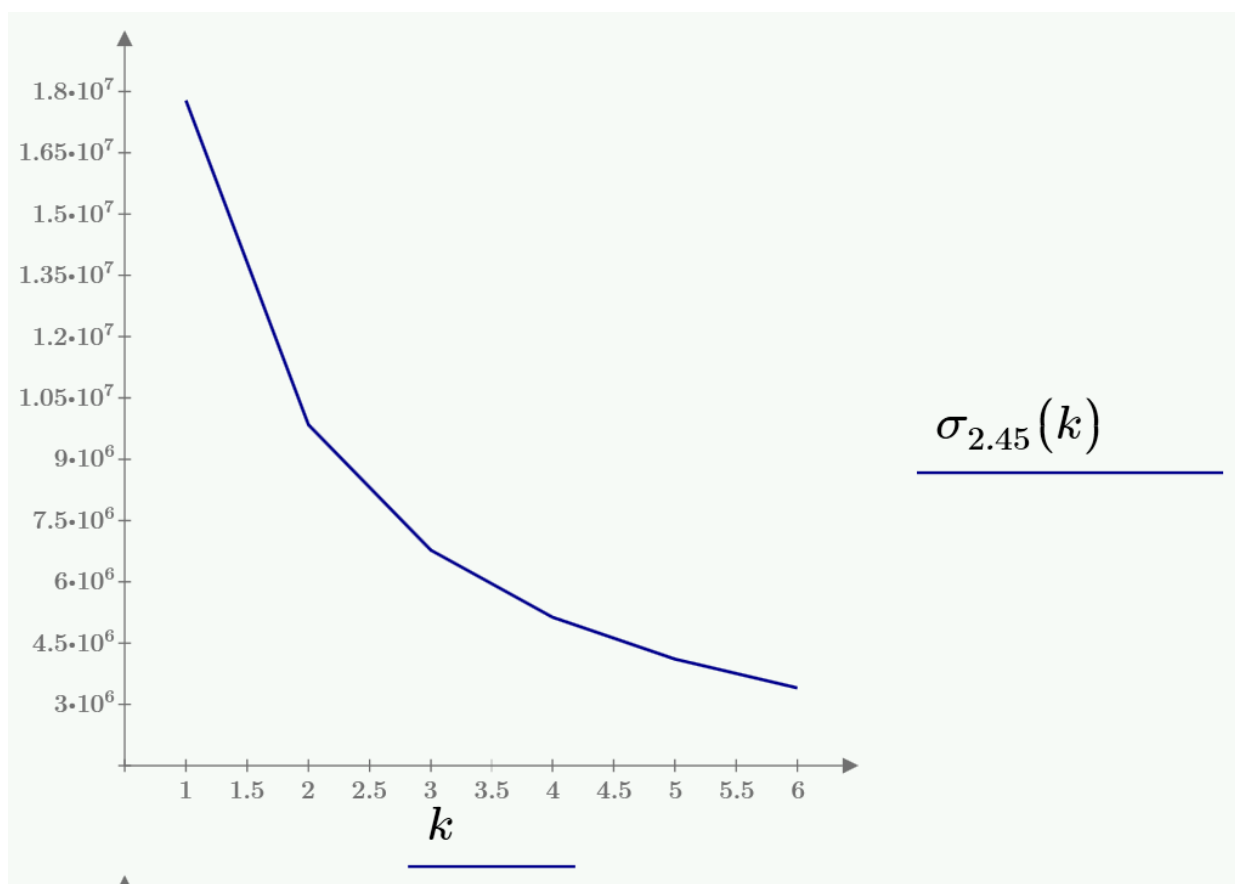
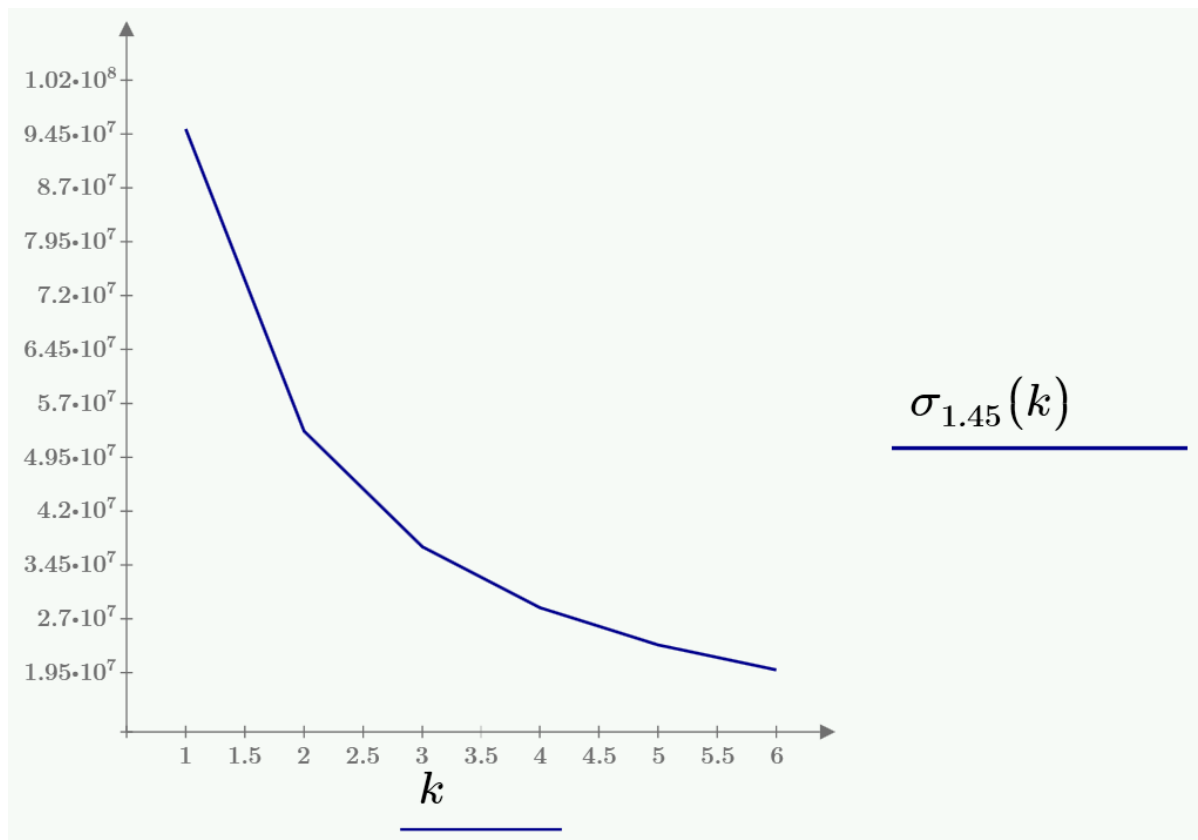
$$e_{zs} = \frac{Q s_x}{D_x C} \approx (8.94 - 3.626k) \cdot 10^{-4};$$

Разраховані значення напружень за формулами уявлені в вигляді графіків:

$$\sigma_1^{(i)} = \overline{E}_1^{(i)} (e_1^{(i)} + \nu_{12}^{(i)} e_2^{(i)}) \quad \Phi 2.5.11;$$

$$\sigma_2^{(i)} = \overline{E}_2^{(i)} (e_2^{(i)} + \nu_{12}^{(i)} e_1^{(i)}) \quad \Phi 2.5.12;$$

$$\tau_{12}^{(i)} = G_{12}^{(i)} e_{12}^{(i)} \quad \Phi 2.5.13;$$



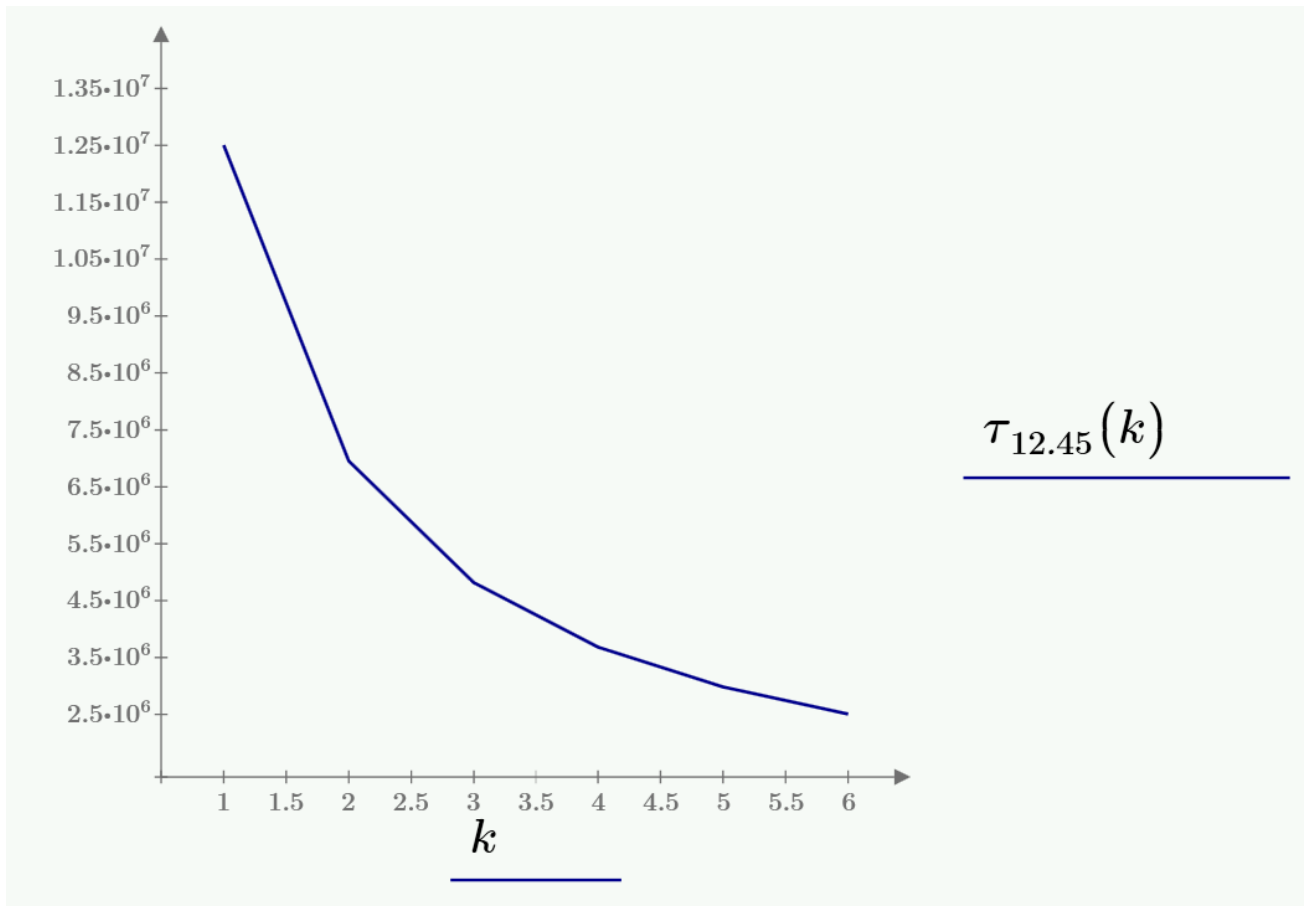


Рис.2.12 Графіки розподілу навантажень: повздовжні , поперечні та дотичні за однаковим зовнішнім діаметром та різною кількістю шарів, для шарів $\pm 45^\circ$

5) Встановимо кількість одно напрямлених шарів дорівнює 3 і зробимо наступну таблицю:

Таблиця 2.7 Порівняння розрахованих значень напружень вуглепластику для шарів 0° та $\pm 45^\circ$ з максимально допустимими, у пакеті з повного вуглепластику.

Параметр	Епоксидний вуглепластик розраховані для шарів 0°	Епоксидний вуглепластик розраховані для шарів $\pm 45^\circ$	Епоксидний вуглепластик максимальні
σ_{1p} (МПа)	190,29	107,94	3377
σ_{1c} (МПа)	190,29	107,94	2026
σ_{2p} (МПа)	2,20	5,56	75
σ_{2c} (МПа)	2,20	5,56	110
τ_{12} (МПа)	0,598	4,81	41,85

В будь-якому напрямку приблизно 10-кратний запас міцності (найменше у дотичних напруженнях $\frac{4,81}{41,85} = 12\%$), фактично кількість шарів задається тільки технологічним обмеженням на товщину стінки 0,8 мм. Наступним кроком буде перевірка жорсткості.

Таблиця 2.8 Порівняння розрахованих значень напружень вуглепластику для шарів 0° з максимально допустимими, у комбінованому пакеті.

Параметр	Епоксидний вуглепластик розраховані для шарів 0°	Епоксидний вуглепластик максимальні
σ_{1p} (МПа)	210	3377
σ_{1c} (МПа)	210	2026
σ_{2p} (МПа)	2,43	75
σ_{2c} (МПа)	2,43	110
τ_{12} (МПа)	0,636	41,85

Констатується незначне зростання напружень у комбінованому варіанті, для шару карбонового волокна, яке дорівнює приблизно $\frac{210-190}{190} \sim 10\%$, що фактично не несе значного впливу

Таблиця 2.8 Порівняння розрахованих значень напружень склопластику для шарів 45° з максимально допустимими, у комбінованому пакеті.

Параметр	Епоксидний склопластик розраховані для шарів $\pm 45^\circ$	Епоксидний склопластик максимальні
σ_{1p} (МПа)	40,82	1422
σ_{1c} (МПа)	40,82	719
σ_{2p} (МПа)	6,01	75
σ_{2c} (МПа)	6,01	110
τ_{12} (МПа)	4,82	49,51

Склопластик за отриманими результатами також що найменш 10-кратним запасом витримує прикладене навантаження, та остаточне рішення буде залежити від критеріїв жорсткості та маси.

Спочатку перевіримо напруження у стінці

$$\overline{\sigma}_z = \frac{N_z}{t}$$

де N_z – зсувні зусилля, $N_z = \frac{Q}{D_x} s_x$; t – загальна товщина пакету, $t = 3t_0 + 2t_{45}$
 $t = 0,925$ мм .

$$N_z = \frac{Q}{D_x} s_x = 16,4(\text{МПа});$$

Порівнюючи з параметрами жорсткості стінки $B(3) = 130,83$ та $C(3) = 123,3$ запас жорсткості стінки є більш ніж очевидним.

Для розрахунку повздожньої жорсткості труби, треба уточнити, що вона складається з двох компонентів та має наступне рівняння.

$$v = \int_0^z (\psi_y - \theta_x) dz;$$

де перший компонент відповідає за прогин, що з'являється в наслідок зсуву

стінки $\psi_y = Q c_y$, де $c_y = \frac{1}{CD_x^2} \oint s_x^2 ds$

та другий відповідає за вигин стрижня $\theta_x = \int_0^z \frac{M_x}{D_x} dz = \frac{Q}{D_x} \left(\frac{z^2}{4} \right)$

Для пакету повністю зробленого з вуглеволокна :

$$c_y = \frac{1}{CD_x^2} \oint s_x^2 ds = (1,72 + 3,53k) \cdot 10^{-9}$$

Для комбінованого:

$$c_y = \frac{1}{CD_x^2} \oint s_x^2 ds = (1,301 + 3,74k) \cdot 10^{-9}$$

Представимо отримані значення прогинів у графічному вигляді

$v, (м)$

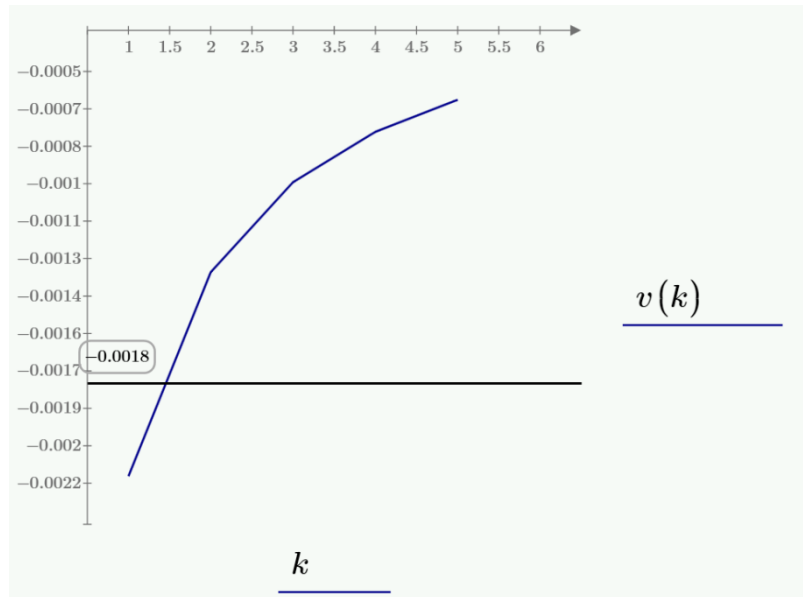


Рис. 2.13 Залежність прогину від k – кількості шарів композитного матеріалу направлених під 0° для композиту повністю наповненого вугле волокном

Горизонтальний маркером позначено максимально допустимий прогин, який дорівнює $v_{max} = \frac{l}{400} = 1,75 \cdot 10^{-3}$

Можна констатувати, що пакети з кількістю одно направлених шарів 2 та 3 мають прогини менші за максимально допустимий $1,3 \cdot 10^{-3}$ та $0,94 \cdot 10^{-3}$, виходячи з технологічного обмеження на товщину, кількість шарів у цьому варіанті 0° обираємо рівною 3 .

$v, (м)$

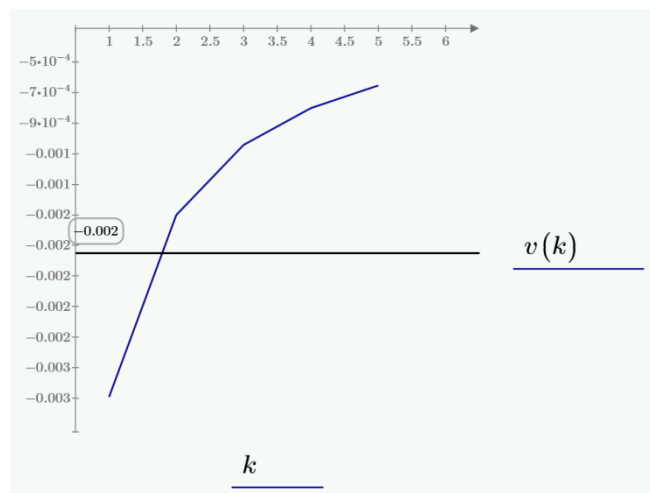


Рис. 2.14 Залежність прогину від k – кількості шарів композитного матеріалу направлених під 0° для композиту повністю наповненого вугле волокном .

Можна аналогічно констатувати, що пакети з кількістю одно направлених шарів 2 та 3 мають прогини менші за максимально допустимий $1,5 \cdot 10^{-3}$ та $0,104 \cdot 10^{-3}$, виходячи з технологічного обмеження на товщину, кількість шарів у цьому варіанті 0° обираємо рівною 3.

Останнім кроком порівняємо масу та щільність двох цих варіантів та приймемо остаточне рішення.

t – загальна товщина пакету в обох випадках дорівнює,

$$t = 3t_0 + 2t_{45} = 0,925 \text{ мм};$$

Щільність знайдемо за об'ємним відношенням беремо значення для смоли та волокна з табл.

Щільність композиту повністю з вугле волокна:

$$p = 0,7 \cdot 1780 + (1 - 0,7) \cdot 1080 = 1570 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Щільність комбінованого композиту:

$$p = (0,7 \cdot 1780 + (1 - 0,7) \cdot 1080) \cdot \frac{3}{5} + (0,7 \cdot 2500 + (1 - 0,7) \cdot 1080) \cdot \frac{2}{5} \\ = 1796 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Висновок: При заміні наповнення двох верхніх шарів запас міцності та жорсткості фактично не змінюється, точніше з відхилення не більше 10%.

Якщо ціллю є повна мінімізація маси, то вважаю доречним використовувати варіант повністю виконаний з наповненням з вуглецевого волокна.

При чому в залежності від виробничої задачі комбінована схема формування цілком можлива.

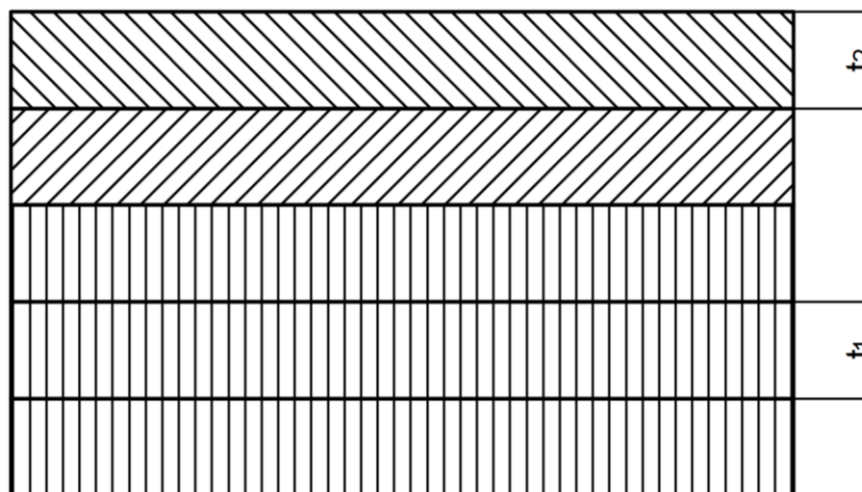


Рис. 2.15 Схематичне зображення орієнтації шарів у пакеті

Табл. 2.9 Порівняння параметрів трубки з алюмінію т

Параметр	Значення для алюмінієвої трубки	Значення для композитної трубки
Діаметр, мм	42	42
Товщина стінки, мм	1	0,925
Площа поперечного перерізу, мм ²	128,74	119,3
Довжина, м	2,13	2,13
Щільність кг/м ³	2770	1570
Маса, кг	0,76	0,4
Перевага у вазі, %	-	46,75

Висновки за розділом:

Розроблено модель композитної ресори, яка армована:

- 3 шарів ровінгу SIGRAFIL T50-4.8/280 (орієнтація волокон 0°),
- 2 шари ровінгу SIGRAFIL T50-4.8/280 (орієнтація волокон ±45°),

Матриця – епоксидна смола PTM&W PT2712 (+ Part B3).

Визначено максимальні навантаження на заданий боковий стрижень дельтаплану Славутич УЧ.

Для отриманої моделі композитного стрижня розраховано параметри моношарів та виконано перевірку на міцність при дії навантажень. За результатами перевірки задана модель:

- Має максимальний прогин на кінці ресори величиною 1,3 мм,
- Зберігає міцність в усіх шарах.

У порівнянні зі сталеною ресорою, при аналогічних умовах роботи, розроблена композитна ресора на 47% легша та має у ~10 разів більшу питому енергію деформації.

					КР.134.4161.03.ПЗ.02	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

					КР.134.4161.03.ПЗ.03							
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата								
Студент		Сергунін І.О.			Технологія виготовлення				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Керівник		Соломонюк Н.С.									46	
Консульт.									НУК			
Н. Контр.		Захарова І.О.							ім. адмірала Макарова			
Зав. каф.		Коростильов Л.І.										

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ

Пултрузія є процесом здобуття профілів шляхом витягування через нагріту до 130 - 150 °С формотворну філь'єру вуглеволоконистих матеріалів, просочених термореактивною смолою. В результаті на виході отримуємо армований профіль, конфігурація якого повторює форму філь'єри. Цим методом можна виготовляти вироби з будь-яким профілем (стрижень, труба, куточок, пластина, швелер, короб і так далі).

При виготовленні виробів методом пултрузії використовують достатньо великий перелік матеріалів, а саме ровинги, смуги зі вуглецевої тканини, вуглецеву тканину та скл нитки. При виготовленні об'ємних конструкцій для зменшення часу виготовлення краще використовувати прошиті смуги вуглеволокна, але більш базовим та доступним матеріалом є ровінги вуглецевих волокон

Для виготовлення трубок дельтаплану методом пултрузії краще використовувати непрошитий ровінг вуглецевих волокон, характеристики якого приведено в табл.

Виготовлення профілю здійснюється за допомогою спеціальної пултрузійної машини, яка має назву пултрудер. Цей метод являється високо технологічним і дозволяє отримувати профіль з швидкістю від 0,04 до 2 метрів за хвилину.

Причому використовується покращена технологія та машина основними складовими такої пултрузійної машини (Рис) є секція подачі вуглематеріалів(1), просочувальна секція(2), філь'єри(3), блок протяжного механізму(4), блок управління нагрівальними елементами , секція обрізання(5).

Вуглецевий ровінг в сухому стані змотується з бобін і збирається певним чином в пучок,при чому у 2 етапи, та у декількох напрямках, потім поступає в пристрій просочення (ванна) зі смолою, де вуглеволокно, змочується епоксидним зв'язуючим. Далі просочений вуглецевий ровінг поступає в нагріту філь'єру, яка формує конфігурацію профілю. Потім, відбувається затвердіння композиції при

заданому температурному режимі. В результаті на виході отримують, вуглепластиковий профіль, конфігурація якого повторює форму філь'єри.

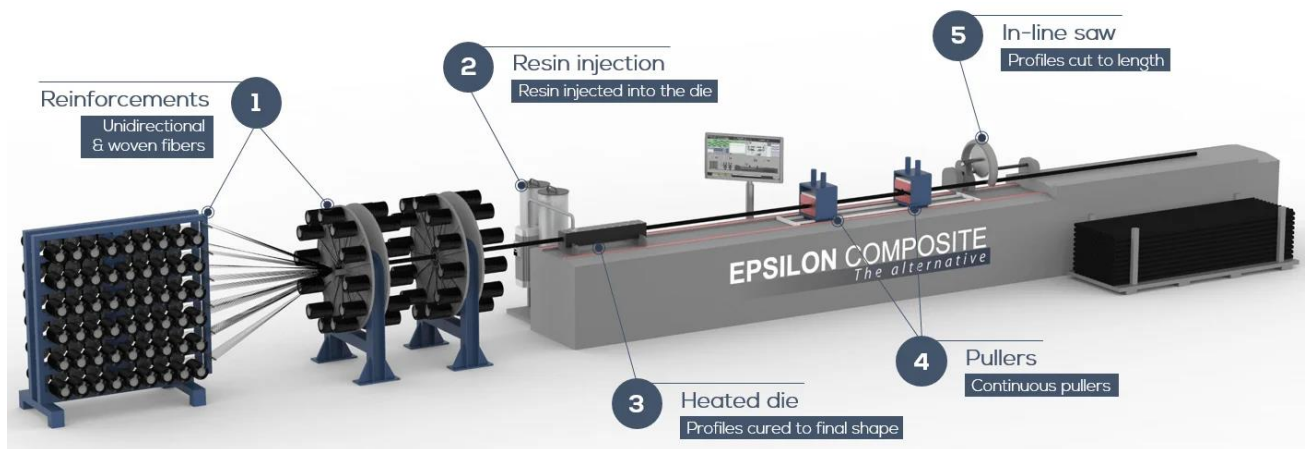


Рис 3.1 Схема технологічного процесу

Тому для виготовлення вуглепластикових трубок з максимальним діаметром 350 мм обираємо пултрудер фірми Epsilon Composites. Нажаль фірма не надає точних серійних номерів своїх машин, але вказана можливість виготовляти труби діаметром 3-300 мм та товщиною стінки від 0.8 до 20 мм будь якої довжини

Вуглецевий ровінг в сухому стані змотується з бобін і збирається певним чином в пучок, який потім обматується під 45° поверх та поступає в пристрій просочення зі смолою, де вуглеволокно, змочується епоксидним зв'язуючим. Далі просочений вуглематеріал поступає в нагріту філь'єру, яка формує конфігурацію профілю. На прикінці, відбувається затвердіння композиції при заданому температурному режимі

3.1 Підготовка вхідних компонентів.

3.1.1 Підготовка армуючого матеріалу.

При поставці вугле ровингу SIGRAFIL T50-4.8/280 виконувати вхідний не руйнівний контроль на відповідність вимогам нормативно-технічної документації. За дві доби до використання вуглецевого ровингу потрібно перенести необхідну

					КР.134.4161.03.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		48

кількість мотків з складських приміщень та помістити в сушильну шафу, що знаходиться в приміщенні підготовки компонентів.

3.1.2 Підготовка гелкоату.

Гелькоат піддають вхідному контролю на співпадіння вимогам до нормативно-технічної документації на них.

За тиждень до використання гелкоату перенести необхідну кількість зі складських приміщень та помістити в приміщення підготовки компонентів.

Перед використанням розмішати вміст ємності, якщо використовується гелкоат різних партій слід злити та перемішати до повної однорідності перед використанням.

3.1.3 Підготовка зв'язуючого.

Перевірки на відповідність вимогам нормативно-технічної документації також підлягають всі вихідні компоненти сполучника, що використовуються у виробничому процесі.

За дві доби до використання сполучника перенести необхідну кількість компонентів сполучника з складських приміщень та помістити компоненти сполучника в приміщення підготовки компонентів.

3.2 Приготування компонентів та контроль.

3.2.1 Підготовка смоли та гелкоату.

В чисту ємність покласти смолу PTM&W PT2712 з затверджувачем Part B3 у пропорції 4:1 за об'ємом або 100:22 за масою.

У чисту ємність відміряти необхідну кількість гелкоату GC50 (сумісного з епоксидними системами). Додати затверджувач MEKP згідно з технічною документацією (приблизно 1–2 % від об'єму гелкоату). Перемішати суміш до однорідності.

					КР.134.4161.03.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		49

Нанесення гелькоуту товщиною 0,2–0,3 мм виконується методом розпилення на внутрішню поверхню формуютьуючої фільєри.

3.2.2 Контроль готового сполучника.

Перемішати сполучник в мішалці протягом 1 хвилини. Записати час закінчення перемішування в технологічний паспорт.

Проконтролювати температуру і умовну в'язкість сполучника на відповідність тех. документації. Записати ці параметри в технологічний паспорт.

Відлити порцію сполучника 50 – 100 г в окрему ємність для контролювання процесу твердіння.

Записати в технологічний паспорт час і дату приготування сполучника.

Пред'явити роботу контролеру відділу технічного контролю.

3.3 Виготовлення вуглепластикових трубок.

3.3.1 Формоутворення трубок.

Встановлюємо бобини з вуглецевим ровингом в шпулярник прямої та перекрестної подачі та протягуємо крізь ролики та закріплюємо.

Переливаємо зв'язуюче з змішувача в пропитуючу ванну пултрудера.

За допомогою пульта керування вмикаємо пултрудер та прогріваємо формуютьуючу фільєру.

Встановлюємо технологічні параметри температури філь'єри – 96С, швидкість протяжки – 1 м/хв., записати параметри в технологічний паспорт. Та розпочинаємо процес пулвідингу.

3.3.2 Механічна обробка різанням.

Після початку протяжки труби відрізати перші 0,5 м коробу. Подальша обробка різанням виконується періодично, в залежності від довжини потрібного стрижня.

Після отримання потрібної довжини коробу, профіль забрати з столу та перекласти на транспортууючу стрічку. Для транспортування на наступну

					КР.134.4161.03.ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

технологічну операцію.

Пред'явити роботу контролеру відділу технічного контролю.

3.3.3 Обладнання та оснащення.

Окрім основного обладнання — пултрудеру, для здійснення технологічного процесу необхідна також допоміжна оснастка, до складу якої входять:

- шпулярник для розміщення катушок з армуючим матеріалом;
- намотуючий пристрій для подачі та формування матеріалу з косим або прямим орієнтуванням волокон;
- змішувач для зв'язуючого для підготовки смоли з затверджувачем у відповідній пропорції;
- пристрій для реєстрації технологічних параметрів (температури, швидкості протяжки тощо);
- подаючі напрямні та опорні конструкції, які забезпечують стабільну подачу волокна до ванни просочення;
- робочі столи для обслуговування та обробки готового профілю.

Вибір і конфігурація цього обладнання здійснюється відповідно до типу та марки пултрудерної установки, а також до конструкції виробу та параметрів виробництва.

У даному розділі представлена технологія виготовлення вуглепласткових трубок.

У етапі було вибрано не прошитий вугле-ровінг SIGRAFIL T50-4.8/280. У якості сполучника — епоксидну смолу PTM&W PT2712 з затверджувачем Part B3.

Технологія для виготовлення є модифікована пултрузія – pulwidin

ВИСНОВКИ

В даному проекті для бакалаврської кваліфікаційної роботи:

1) Проаналізовано існуючу конструкцію бокового стрижня, освітлено їхні переваги та недоліки, області використання. Об'єктом роботи обрано конструкцію бокового стрижня рами дельтаплану Славутич УТ.

Розраховано максимальні експлуатаційні навантаження прикладені по середині секції бокової трубки при максимальній льотній вазі у 115 кг. Максимальне навантаження – 1 кН,

2) Обрано та обґрунтовано матеріал композитної ресори – середньо модульне -вуглеволокно та епоксидна матриця. Для обраних матеріалів підібрані марки доступних на ринку пропозицій: Не прошитий ровінг SIGRAFIL T50-4.8/280. Епоксидна смола PTM&W PT2712 (+ затверджувач Part B3).

3) Розроблено модель армування жорсткого композитного стрижня на основі умов експлуатації та вимог до міцності та жорсткості:

Отримані розміри перерізу стрижня: Зовнішній діаметр – 42 мм, внутрішній діаметр – 39,7 мм.

4) Для обраної моделі армування визначено масу стрижня та максимальне можливе навантаження за умовами міцності та жорсткості. За отриманими значеннями виконано порівняльну характеристику композитного стрижня та відповідного алюмінієвого стрижня. Порівняльна характеристика показала, що використання композиту зменшує масу бічного стрижня на 47% (38% з урахування гелькоуту), питома енергія деформації збільшується у 10 разів.

Розроблено технологію виготовлення бічного стрижня рами дельтаплану пулідингу (модернізована пултрузія). Обрано усі необхідні матеріали, що доступні на сучасному ринку, для розробленого технологічного процесу.

					КР.134.4161.03.ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) «Славутич-УТ» опис конструкції, креслення та історія появи», - стаття.
<https://www.deltaplanerizm.ru/read/slavutich/>
- 2) «High strength super light-weight tubing», - сайт компанії «Finsterwalder-Charly».
<https://finsterwalder-charly.de/en/light-weight-tubing.html>
- 3) «History of hang-gliding», - стаття .
<https://www.freedom-parapente.fr/en/blog/deltaplane-or-paraglider-what-are-the-differences>
- 4) «The Lever Link», стаття.
<https://jmrware.com/articles/2008/leverlink/LeverLink.html>
- 5) Hugh O. Pierson «Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes Properties, Processing and Applications», - 2002, - ст 166-196.
- 6) Krishan K , «Composite Materials : Science and Engineering by Chawla», - 1998 //Topics Surfaces (Physics), Surfaces (Physique), - New York, - ст 72-108
https://archive.org/details/compositemateria0000chaw_y7n7/page/72/mode/1up
- 7) Ever J. Barbero, «Introduction to compositematerials design, third edition», - 2018 ст 37- 46
https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781315296487_A31477022/preview-9781315296487_A31477022.pdf
- 8) Trevor. Starr, «Pultrusion for engineers», - Boston, New-York, -ст 19-47
<https://zlibrary.to/filedownload/pultrusion-for-engineers-0>
- 9) Епоксидна смола PTM&W PT2712 (+ затверджувач Part B3)
[https://www.rockwestcomposites.com/on/demandware.static/Sites-RWC-Site/Sites-rwc-master-catalog/-/downloads/PT2712-Epoxy_\(031808-C3\).pdf?srsId=AfmBOooGBRho3jbGH4WoHKyNSoRFGFQ_fd3GC20Lgj1lc_to85mdplJh](https://www.rockwestcomposites.com/on/demandware.static/Sites-RWC-Site/Sites-rwc-master-catalog/-/downloads/PT2712-Epoxy_(031808-C3).pdf?srsId=AfmBOooGBRho3jbGH4WoHKyNSoRFGFQ_fd3GC20Lgj1lc_to85mdplJh)
- 10) Не прошитий ровінг SIGRAFIL T50-4.8/280
<https://www.sglcarbon.com/loesungen/material/sigrafil-carbon-endlosfasern/>

					КР.134.4161.03.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		53