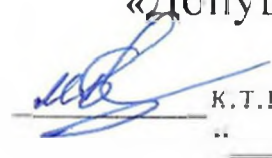


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Кораблебудівний навчально-науковий інститут
Кафедра будівельної механіки та конструкції корпусу корабля

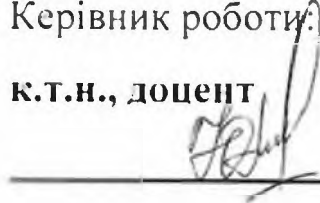
«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри
к.т.н., доцент М.М. Бобров
" " " 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти бакалавра

на тему: Розробка конструкції та технології
виготовлення балки перекриття з композиційного
матеріалу

Виконав: студент групи 4161

Соломонюк А.Д.

Керівник роботи:
к.т.н., доцент

Юреско Т. А.

Миколаїв 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Начально науковий інститут(факультет) _____ КННІ _____
Кафедра _____ БМ та ККК _____
Спеціальність _____ 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» _____

(шифр і назва)

Освітня програма «Проектування та виробництво конструкцій із композиційних матеріалів»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

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

“ 15 ” 06 2026 року

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

Студенту _____ Соломонюк Алісі Денисівні _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка конструкції та технології виготовлення балки перекриття із композиційного матеріалу.

Керівник роботи: _____ Юреско Тетяна Анатоліївна, к.т.н., доцент _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора № 391уч від “09” червня 2026 року

2. Термін подання роботи _____ 10.06.2026 _____

**3. Вихідні дані по роботі об'єкт – коробчаста однопролітна балка перекриття для хаусбота з параметрами: $L - 6 \text{ м}$, $b - 15 \text{ см}$, $h - 20 \text{ см}$, кут нахилу $\alpha - 20^\circ$.
Параметри одноповерхового хаусбота: $L - 13,1 \text{ м}$, $b - 9,4 \text{ м}$, $h - 3,4-5,3 \text{ м}$.**

4. Перелік питань, що належать до розробки

1) Провести аналіз типів та матеріалів, з яких виготовляються балки перекриття;

2) Проаналізувати та вибрати матеріали з яких буде виготовлятися балка перекриття, сполучник та армувальні матеріали;

3) Розрахувати навантаження на балку перекриття від впливу вертикальних (сніг, власна вага, вага даху) та горизонтальних навантажень (вітер), перевірити міцність та жорсткість балки;

4) Вибрати технологію виготовлення балки перекриття;

5) Зробити висновки стосовно доцільності використання композиційних матеріалів для будівництва балок перекриття та результатів розрахунків параметрів балки.

5. Перелік презентаційних матеріалів 1 – Балки з різних матеріалів, їх переваги та недоліки, 2, 3 – Вибір матеріалів для виготовлення балки, 4, 5 – Розрахунки

вертикальних та горизонтальних навантажень на балку, 6 – Перевірка міцності та жорсткості балки, 7 – Технологія виготовлення балки перекриття.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1			
2	Соломонюк Н.С		
3	Соломонюк Н.С		
4			

7. Дата видачі

завдання 09.02.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та технічних матеріалів	17.04.26	
2	Аналіз та вибір матеріалів	05.05.26	
3	Розрахунки навантажень на балку перекриття	15.05.26	
4	Розробка технологічного процесу виробництва композиційного матеріалу та виробу з нього	04.06.26	
5	Оформлення пояснювальної записки та графічних матеріалів	10.06.2026	

Студент Соломонюк А.Д.
(підпис)

Керівник роботи Юрєско Т.А.
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Розроблено конструкцію коробчастої балки перекриття з композиційного матеріалу для одноповерхового хаусбота. У якості полімерної матриці обрано термореактивну вінілефірну смолу, армування виконано комбінацією біаксіальної склотканини E-glass та однонапрямого високоміцного вуглецевого волокна, що забезпечує високу питому міцність і жорсткість. Виконано розрахунок вертикальних (сніг, власна вага, вага даху) та горизонтальних (вітер) навантажень для балки прольотом 6 м, визначено небезпечні перерізи, згинальні моменти та прогини. Проведено перевірку умов міцності, жорсткості та міжшарового зсуву, які підтвердили працездатність конструкції. Для виготовлення обрано технологію RTM Light, розроблено конструкцію оснастки (жорстка матриця з вакуумною кришкою), структуру армувального пакета та детальний технологічний процес. Використання композитних матеріалів дозволяє суттєво знизити власну вагу балки та підвищити її корозійну стійкість порівняно з традиційними рішеннями.

Ключові слова: балка перекриття, композиційний матеріал, вінілефірна смола, вуглецеве волокно, склотканина, RTM Light, міцність, жорсткість.

ABSTRACT

A design has been developed for a composite box girder floor beam for a single-storey houseboat. A thermosetting vinyl ester resin was selected as the polymer matrix, and the reinforcement consists of a combination of biaxial E-glass fabric and unidirectional high-strength carbon fibre, ensuring high specific strength and stiffness. Calculations were performed for vertical (snow, dead load, roof weight) and horizontal (wind) loads for a beam with a 6 m span; critical sections, bending moments and deflections were determined. Checks were carried out for strength, stiffness and interlaminar shear conditions, which confirmed the structural integrity of the design. The RTM Light technology was selected for manufacturing; the mould design (rigid mould with a vacuum cover), the structure of the reinforcement package and the

					КР.134.4161.05.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		4

detailed manufacturing process were developed. The use of composite materials allows for a significant reduction in the beam’s dead weight and an increase in its corrosion resistance compared to traditional solutions.

Keywords: *floor beam, composite material, vinyl ester resin, carbon fibre, glass fabric, RTM Light, strength, stiffness.*

ЗМІСТ

Вступ.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	11
1.1. Загальні відомості.....	12
1.2. Дерев'яні балки перекриття.....	13
1.3. Металеві балки перекриття.....	15
1.4. Залізобетонні балки перекриття.....	16
1.5. Комбіновані балки перекриття.....	18
1.6. Композитні балки перекриття.....	20
1.7. Постановка задачі.....	22
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТА ВИБІР МАТЕРІАЛІВ.....	23
2.1. Аналіз полімерних смол.....	25
2.2. Аналіз армувальних матеріалів.....	29
2.2.1. Скловолоконні армувальні матеріали.....	30
2.2.2. Карбонові армувальні матеріали.....	33
2.3. Висновки до розділу.....	36
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ НАВАНТАЖЕНЬ НА БАЛКУ ПЕРЕКРИТТЯ.....	37
3.1. Зовнішні навантаження на балку.....	38
3.1.1. Вертикальні навантаження на балку.....	38
3.1.2. Горизонтальні навантаження на балку.....	39
3.1.3. Сумарні значення.....	40
3.2. Розрахунок міцності та жорсткості композиційного матеріалу.....	41
3.2.1. Розрахунок фізико-механічних характеристик пакету КМ.....	44
3.2.2. Перевірка міцності та жорсткості розрахованого пакету.....	45
3.3. Висновки до розділу.....	46
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ТА ВИРОБУ З НЬОГО.....	48
4.1. Аналіз технологій виготовлення композитних конструкцій.....	49
4.2. Вибір формуючої оснастки для виготовлення балки.....	51

4.3. Розробка структури армувального пакета.....	54
4.4. Розробка технологічного процесу формування балки методом RTM Light.....	56
4.5. Механічна обробка та доведення композитної балки.....	60
4.6. Висновки до розділу.....	62
ВИСНОВКИ.....	63
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64

					КР.134.4161.05.ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасне будівництво характеризується постійним підвищенням вимог до міцності, надійності, довговічності та маси конструкцій. Особливо актуальним це питання є для легких споруд та плавучих будівель, до яких належать хаусботи. У таких конструкціях зменшення маси окремих елементів дозволяє знизити загальне навантаження на корпус та інші несучі елементи, а також сприяє спрощенню монтажу й транспортування.

Одним із основних несучих елементів перекриття є балка, яка сприймає навантаження від власної ваги конструкції, покрівлі, снігу та інших експлуатаційних впливів. Традиційні матеріали для виготовлення балок, зокрема деревина, метал і залізобетон, мають достатні експлуатаційні характеристики, однак кожен із них характеризується певними обмеженнями. До них належать значна власна маса, схильність до корозії або біологічного руйнування, складність монтажу та обмежена ефективність використання матеріалу при необхідності перекриття значних прольотів.

Перспективним напрямком вирішення зазначених проблем є застосування композиційних матеріалів. Поєднання полімерної матриці з високоміцними армувальними волокнами дозволяє цілеспрямовано формувати необхідні механічні характеристики конструкції. Композитні матеріали характеризуються високою питомою міцністю та жорсткістю, малою густиною і високою корозійною стійкістю, що робить їх перспективними для використання в конструкціях хаусботів. У роботі розглядається можливість застосування коробчастої балки, яка забезпечує ефективне використання матеріалу та достатню жорсткість при відносно невеликій масі.

Актуальність роботи полягає у необхідності розроблення легкої та довговічної конструкції балки перекриття для хаусбота з використанням композиційного матеріалу, а також у визначенні раціонального поєднання армувальних матеріалів, полімерної матриці та технології виготовлення. Для проєктованої конструкції обрано термореактивну вінілефірну смолу,

					КР.134.4161.05.ПЗ	Лист
						8
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

склотканину E-glass та однонапрямне вуглецеве волокно. Така комбінація дозволяє поєднати технологічність і відносно невисоку вартість скловолокна з високими показниками міцності та жорсткості вуглецевого армування.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення конструкції та технології виготовлення коробчастої балки перекриття з композиційного матеріалу для одноповерхового хаусбота, а також перевірка її працездатності за умов дії основних експлуатаційних навантажень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати існуючі типи балок перекриття та матеріали, що застосовуються для їх виготовлення;
- проаналізувати властивості полімерних матриць і армувальних матеріалів та обґрунтувати їх вибір для проєктованої конструкції;
- визначити вертикальні та горизонтальні навантаження, що діють на балку;
- виконати розрахунок напружено-деформованого стану конструкції та перевірити умови її міцності, жорсткості й міжшарового зсуву;
- розробити структуру армувального пакета композиційного матеріалу;
- проаналізувати сучасні технології виготовлення композитних конструкцій та обрати раціональну технологію для виготовлення балки;
- розробити технологічний процес виготовлення балки методом RTM Light;
- оцінити доцільність застосування композиційного матеріалу для проєктованої конструкції.

Об'єктом дослідження є коробчата однопролітна балка перекриття для одноповерхового хаусбота.

Предметом дослідження є конструктивні, фізико-механічні та технологічні характеристики композитної балки перекриття, виготовленої з використанням вінілефірної полімерної матриці, склотканини E-glass та однонапрямого вуглецевого волокон

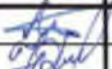
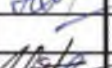
Методи дослідження включають аналіз літературних і технічних джерел, порівняння конструктивних рішень та матеріалів, розрахунок зовнішніх навантажень, визначення напружено-деформованого стану композиційної

					КР.134.4161.05.ПЗ	Лист
						9
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

конструкції, перевірку міцності та жорсткості, а також розроблення технологічного процесу виготовлення композитного виробу.

Практичне значення роботи полягає у розробленні конструктивного та технологічного рішення композитної балки перекриття, придатного для застосування у легких плавучих спорудах. Запропонована конструкція та технологія її виготовлення можуть бути використані як основа для подальшого вдосконалення композитних несучих елементів хаусботів та інших легких конструкцій.

					КР.134.4161.05.ПЗ	Лист
						10
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

					КР.134.4161.05.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1		
Студент		Соломонюк А.Д.					
Керівник		Юреско Т.А.					
Н. контро.		Захарова І.О.			НУК		
Зав. каф.		Бобров М.М					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						11	12

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ.

1.1. Загальні відомості

У сучасному будівництві балки перекриття є одними з основних несучих елементів конструкцій будівель і споруд. Вони забезпечують сприйняття та передачу навантажень від перекриттів на вертикальні несучі елементи, а також впливають на жорсткість, надійність і довговічність усієї конструкції. Вибір типу балки залежить від призначення будівлі, величини навантажень, довжини прольоту, умов експлуатації та економічної доцільності.



Рисунок 1.1. Міжповерхове балкове перекриття

На сьогоднішній день у будівництві широко застосовуються дерев'яні, металеві, залізобетонні та комбіновані балки перекриття. Кожен із зазначених типів має власні конструктивні особливості, переваги та недоліки. Традиційні матеріали забезпечують достатню міцність і надійність, проте часто характеризуються значною масою, схильністю до корозії або обмеженнями щодо довговічності та ефективності використання матеріалу.

У зв'язку з цим актуальним напрямком розвитку будівельних конструкцій є застосування композитних матеріалів для виготовлення балок перекриття. Композитні конструкції дозволяють зменшити власну вагу елементів, підвищити корозійну стійкість та забезпечити високі показники питомої міцності.

					КР.134.4161.05.ПЗ.01	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		12

Особливий інтерес становлять коробчасті композитні балки, які поєднують малу масу, достатню жорсткість і ефективний розподіл напружень у перерізі.

У даному розділі буде розглянуто основні типи балок перекриття, їх конструктивні особливості, переваги та недоліки, а також проведено аналіз доцільності застосування композитних коробчастих балок у будівельних конструкціях.

1.2. Дерев'яні балки перекриття

Дерев'яні балки перекриття є одним із найпоширеніших типів несучих конструкцій у малоповерховому будівництві. Вони застосовуються в житлових будинках, мансардах, господарських спорудах та каркасних конструкціях. Даний вид балок один з найдешевших і прости у влаштуванні. Основною функцією дерев'яних балок є сприйняття навантажень від елементів перекриття та передача їх на несучі стіни або опори.



Рисунок 1.2. Дерев'яна балка перекриття.

Для виготовлення балок найчастіше використовують деревину хвойних порід, зокрема сосну, ялину або модрина, що обумовлено достатньою міцністю матеріалу та його відносно невеликою масою. Балки можуть мати суцільний прямокутний переріз або виготовлятися у вигляді клеєних чи двотаврових конструкцій. Стандартна висота перерізу таких балок становить 130, 150, 180 та 200 мм, а товщина – 75 та 100 мм.

Основною перевагою дерев'яних балок є їх мала власна вага, що дозволяє зменшити навантаження на фундамент та несучі конструкції будівлі. Крім того, деревина характеризується хорошими теплоізоляційними властивостями, простотою механічної обробки та відносно невисокою вартістю. Монтаж дерев'яних балок не потребує застосування важкої будівельної техніки, що значно спрощує процес будівництва.

До переваг дерев'яних балок перекриття належать:

- невелика маса конструкції;
- простота монтажу та обробки;
- доступність матеріалу;
- хороші теплоізоляційні характеристики;
- економічність у малоповерховому будівництві.

Разом із перевагами дерев'яні балки мають і ряд недоліків. Деревина є горючим матеріалом, що знижує рівень пожежної безпеки конструкції. Також матеріал чутливий до впливу вологи, грибка, комах та біологічного руйнування, через що потребує додаткового захисту антисептичними та вогнезахисними засобами. При значних навантаженнях або великих прольотах дерев'яні балки можуть зазнавати помітних прогинів.

До основних недоліків дерев'яних балок належать:

- обмежена несуча здатність;
- схильність до гниття та впливу вологи;
- горючість матеріалу;
- можливість виникнення значних прогинів;
- обмеження щодо довжини прольоту.

Незважаючи на зазначені недоліки, дерев'яні балки перекриття залишаються ефективним та економічно доцільним рішенням для малоповерхового будівництва, особливо у випадках, коли пріоритетом є зменшення маси конструкції та спрощення монтажних робіт.

1.3. Металеві балки перекриття

Металеві балки перекриття широко застосовуються у промисловому, громадському та багатопверховому будівництві завдяки високій міцності та здатності сприймати значні навантаження. Основною функцією металевих балок є передача навантажень від елементів перекриття на несучі конструкції будівлі при забезпеченні необхідної жорсткості та стійкості.



Рисунок 1.3. Металева балка перекриття.

Для виготовлення металевих балок найчастіше використовують конструкційну сталь. Найбільш поширеними типами перерізів є двотаврові балки, швелери, коробчасті та трубчасті профілі. Завдяки високим механічним характеристикам сталі металеві балки можуть перекривати значні прольоти при відносно невеликих розмірах поперечного перерізу.

Основною перевагою металевих балок є їх висока несуча здатність і жорсткість. Металеві конструкції дозволяють реалізовувати великопрольотні перекриття та складні інженерні рішення. Крім того, сталеві балки мають високу точність виготовлення та добре працюють при динамічних навантаженнях.

До переваг металевих балок перекриття належать:

- висока міцність та жорсткість;
- можливість перекриття великих прольотів;
- відносно невеликі розміри поперечного перерізу;
- стійкість до значних навантажень;

- висока точність виготовлення конструкцій.

Разом із перевагами металеві балки мають і певні недоліки. Одним із головних недоліків є схильність сталі до корозії, через що конструкції потребують антикорозійного захисту. Також метал характеризується високою теплопровідністю та втрачає міцність при дії високих температур, тому балки потребують додаткового вогнезахисту. Монтаж металевих конструкцій часто вимагає застосування спеціальної техніки та зварювального обладнання.

До основних недоліків металевих балок належать:

- схильність до корозії;
- необхідність антикорозійного та вогнезахисного покриття;
- висока вартість металу;
- значна теплопровідність;
- складність монтажу при великих розмірах конструкцій.

Завдяки своїм експлуатаційним характеристикам металеві балки перекриття широко використовуються у будівлях із великими прольотами та підвищеними навантаженнями. Проте значна маса окремих елементів, потреба в захисті від корозії та висока вартість матеріалу стимулюють розвиток альтернативних конструкцій, зокрема композитних балок із покращеним співвідношенням міцності до маси.

1.4. Залізобетонні балки перекриття

Залізобетонні балки перекриття є одними з найбільш поширених несучих елементів у сучасному будівництві. Вони широко застосовуються у житлових, громадських, промислових та інженерних спорудах завдяки високій міцності, довговічності та надійності. Основною функцією залізобетонних балок є сприйняття навантажень від перекриттів та передача їх на колони, стіни або інші несучі елементи конструкції.

Залізобетонні балки складаються з бетону та сталеві арматури, які спільно працюють під дією навантаження. Бетон добре сприймає стискаючі напруження, тоді як арматура забезпечує роботу конструкції на розтяг. Завдяки такому поєднанню матеріалів забезпечується висока несуча здатність і жорсткість конструкції.



Рисунок 1.4. Залізобетонна балка перекриття.

Залежно від способу виготовлення залізобетонні балки поділяються на монолітні та збірні. Монолітні балки виготовляються безпосередньо на будівельному майданчику, тоді як збірні елементи виробляються на заводах і монтується за допомогою підйомної техніки.

До широкого впровадження в будівництві залізобетону для влаштування важкоспалюваних і водостійких перекриттів застосовували металеві балки (із прокатних профілів) (рис.6.5). У даний час конструктивні рішення перекриттів використовують рідко, їх можна зустріти в основному при виконанні ремонтних робіт і реконструкції будинків. Тут важливо пам'ятати, що балки повинні бути надійно захищені від впливу чи вогню високих температур (більше 140 °C).^[1]

Основними перевагами залізобетонних балок є висока міцність, довговічність та вогнестійкість. Конструкції добре працюють при значних статичних і динамічних навантаженнях, мають високу жорсткість та характеризуються відносно невеликими прогинами. Крім того, залізобетон є стійким до впливу атмосферних факторів та біологічного руйнування.

До переваг залізобетонних балок перекриття належать:

- висока несуча здатність;
- значна довговічність конструкції;

- висока вогнестійкість;
- стійкість до впливу навколишнього середовища;
- хороша жорсткість і надійність.

Разом із перевагами залізобетонні балки мають і ряд недоліків. Одним із основних недоліків є велика власна маса конструкцій, що збільшує навантаження на фундамент та ускладнює транспортування й монтаж. Виготовлення та встановлення залізобетонних елементів часто потребує застосування важкої будівельної техніки. Крім того, монолітні конструкції характеризуються значною тривалістю виконання робіт через необхідність встановлення опалубки та витримування бетону до набору міцності.

До основних недоліків залізобетонних балок належать:

- велика власна вага;
- складність транспортування та монтажу;
- необхідність застосування важкої техніки;
- значна тривалість виконання монолітних робіт;
- утворення тріщин при перевищенні допустимих навантажень.

Незважаючи на зазначені недоліки, залізобетонні балки залишаються одним із найбільш надійних та універсальних рішень у будівництві. Проте значна маса конструкцій і складність монтажу сприяють пошуку альтернативних матеріалів і конструктивних рішень, серед яких особливу увагу привертають легкі композитні балки з високими показниками питомої міцності.

1.5. Комбіновані балки перекриття

Комбіновані балки перекриття являють собою конструкції, виготовлені з поєднання декількох матеріалів, які спільно працюють під дією навантаження. Основною метою застосування комбінованих балок є поєднання переваг різних матеріалів та зменшення їх недоліків. Найбільш поширеними є дерев'яно-металеві, дерев'яно-композитні та залізобетонні балки.

У сучасному будівництві комбіновані балки широко застосовуються у житлових, громадських та промислових будівлях. Особливого поширення набули дерев'яні двотаврові балки, у яких полиці виготовляються з деревини або клеєного бруса, а стінка - з OSB-плити або фанери. Такі конструкції дозволяють значно зменшити масу балки при забезпеченні достатньої жорсткості та міцності.

Принцип роботи комбінованих балок полягає у раціональному розподілі навантаження між матеріалами залежно від їх механічних властивостей. Наприклад, металеві елементи ефективно працюють на розтяг, бетон — на стиск, а деревина забезпечує зменшення маси конструкції та покращення теплоізоляційних характеристик.

До основних переваг комбінованих балок перекриття належать:

- зменшення власної маси конструкції;
- більш ефективне використання матеріалів;
- підвищення жорсткості та несучої здатності;
- можливість перекриття більших прольотів;
- покращення теплоізоляційних характеристик у порівнянні з металевими конструкціями;
- економія матеріалу за рахунок раціонального розподілу елементів у перерізі.

Разом із перевагами комбіновані балки мають і певні недоліки. Конструкції такого типу є складнішими у виготовленні та розрахунку, оскільки необхідно враховувати спільну роботу матеріалів із різними фізико-механічними властивостями. Важливим фактором є забезпечення надійного з'єднання між окремими елементами балки, оскільки порушення спільної роботи матеріалів може призвести до втрати міцності та жорсткості конструкції.

До основних недоліків комбінованих балок належать:

- складність конструкції та розрахунку;
- підвищені вимоги до якості з'єднань;
- складніша технологія виготовлення;

- можливість нерівномірної деформації матеріалів;
- вища вартість у порівнянні з традиційними дерев'яними конструкціями.

Комбіновані балки перекриття є перспективним напрямком розвитку будівельних конструкцій, оскільки дозволяють отримати оптимальне співвідношення між міцністю, жорсткістю та масою. Саме ідея раціонального поєднання матеріалів лежить в основі створення сучасних композитних балок, які забезпечують ще вищі показники ефективності та експлуатаційних характеристик.

1.6. Композитні балки перекриття

Композитні балки перекриття є сучасним видом несучих конструкцій, виготовлених із композиційних матеріалів, які складаються з армувального наповнювача та зв'язувальної матриці. Як армувальні елементи найчастіше використовують вуглецеві, скляні або базальтові волокна, а в якості матриці — полімерні смоли. Поєднання таких матеріалів дозволяє отримати конструкції з високими механічними характеристиками при відносно невеликій масі.

У будівництві композитні балки застосовуються для перекриття прольотів у спорудах, де важливими є мала вага конструкції, стійкість до корозії та висока довговічність. Особливий інтерес становлять коробчасті композитні балки, конструкція яких забезпечує ефективний розподіл напружень та підвищену жорсткість при мінімальній витраті матеріалу.

Основною особливістю композитних балок є високе співвідношення міцності до маси. У порівнянні з традиційними металевими або залізобетонними конструкціями композитні балки мають значно меншу власну вагу, що дозволяє знизити навантаження на фундамент та спростити монтаж конструкцій. Крім того, композитні матеріали характеризуються високою корозійною стійкістю та не піддаються біологічному руйнуванню.

До основних переваг композитних балок перекриття належать:

- мала власна маса;

					КР.134.4161.05.ПЗ.01	Лист
						20
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

- висока питома міцність;
- корозійна стійкість;
- довговічність конструкції;
- можливість виготовлення складних та порожнистих профілів;
- хороші показники втомної міцності;
- зниження навантаження на несучі елементи будівлі.

Разом із перевагами композитні балки мають і ряд недоліків. Одним із основних недоліків є висока вартість матеріалів та технологій виготовлення. Крім того, композитні матеріали мають анізотропні властивості, тобто їх механічні характеристики залежать від напрямку армування волокон, що ускладнює процес розрахунку конструкцій. Також для композитів характерний менш пластичний характер руйнування у порівнянні зі сталлю.

До основних недоліків композитних балок належать:

- висока вартість виготовлення;
- складність інженерних розрахунків;
- анізотропія механічних властивостей;
- складність з'єднання конструктивних елементів;
- можливість крихкого руйнування;
- обмежена нормативна база для проєктування.

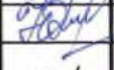
Незважаючи на зазначені недоліки, композитні балки перекриття є перспективним напрямком розвитку сучасних будівельних конструкцій. Поєднання малої маси, високої міцності та корозійної стійкості робить їх ефективною альтернативою традиційним матеріалам, особливо у випадках, де необхідне зменшення навантаження на конструкцію та підвищення довговічності споруди. Саме тому дослідження композитних коробчастих балок є актуальним напрямком розвитку сучасного будівництва та інженерних конструкцій.

1.7. Постановка задачі

На основі проведеного аналізу існуючих типів балок перекриття було встановлено, що традиційні конструкції, виготовлені з деревини, металу або залізобетону, поряд із високими експлуатаційними характеристиками мають ряд недоліків, серед яких значна власна маса, схильність до корозії або біологічного руйнування, а також обмеження щодо довжини прольоту та ефективності використання матеріалу. У зв'язку з цим актуальним є розроблення сучасних конструкцій балок перекриття із застосуванням композиційних матеріалів.

На основі проведеного аналізу існуючих конструкцій балок перекриття встановлено доцільність розробки композитної балки для використання у довгопрольотних перекриттях. Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз існуючих типів балок перекриття, визначити їх переваги та недоліки, виконати порівняння конструкцій з різних матеріалів та обґрунтувати доцільність застосування композитних матеріалів.
2. Проаналізувати армувальні матеріали та полімерні сполучники, що використовуються для виготовлення композиційних конструкцій. Дослідити їх основні властивості та обґрунтувати вибір матеріалів для проєктованої балки.
3. Виконати розрахунок навантажень, що діють на балку під час експлуатації, та визначити небезпечні перерізиконструкції. Провести розрахунок напружено-деформованого стану балки. Сформувати армувальний пакет та перевірити умови міцності, жорсткості та зсуву.
4. Розглянути сучасні технології виготовлення композитних виробів, виконати їх порівняльний аналіз та обрати технологію, що забезпечує необхідні вимоги до якості, точності та економічності виробництва. Розробити технологічний процес виготовлення композитної балки. Описати послідовність приготування та виготовлення композитного виробу.

					КР.134.4161.05.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Студент		Соломонюк А.Д.			Розділ 2	Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник		Юреско Т.А.					23	14
						НУК		
Н. контр.		Захарова І.О.						
Зав. каф.		Бобров М.М.						

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТА ВИБІР МАТЕРІАЛУ ДЛЯ БАЛКИ ПЕРЕКРИТТЯ

Композитна балка перекриття розробляється для стелі одноповерхового хаусбота^[5] довжиною 13,2 м, шириною 9,4 м та висотою стелі від 3,4 м до 5,3 м, зображеного на рисунку 2.1. Оригінальна балка перекриття виготовлена з модрина.



Рисунок 2.1. Зовнішній вигляд хаусбота, для якого розробляється балка перекриття

Одним із ключових етапів проектування композитних конструкцій є вибір матеріалів, оскільки саме від їхніх фізико-механічних властивостей залежать міцність, жорсткість, довговічність та маса готового виробу. На відміну від традиційних матеріалів, композити дозволяють цілеспрямовано формувати необхідні характеристики конструкції шляхом комбінування армувальних наповнювачів та полімерної матриці.

Для виготовлення композитної балки перекриття необхідно обрати як армувальні матеріали, так і зв'язувальну речовину. Армувальний матеріал забезпечує сприйняття основних механічних навантажень, тоді як полімерна матриця об'єднує волокна в єдину структуру, передає між ними напруження та захищає їх від зовнішнього впливу.

На сучасному ринку існує велика кількість полімерних смол та армувальних матеріалів, що відрізняються за вартістю, технологічністю та експлуатаційними характеристиками. Для конструкційного застосування найбільш поширеними є епоксидні, поліефірні та вінілефірні смоли, а серед армувальних матеріалів — скляні, вуглецеві та арамідні волокна.

У даній роботі для виготовлення балки перекриття обрано вінілефірну смолу, склотканину Е-типу та однонапрямне вуглецеве волокно (unidirectional carbon fiber). Вибір цих матеріалів обумовлений їхнім поєднанням високих механічних характеристик, достатньої технологічності та стійкості до експлуатаційних навантажень. У наступних підрозділах буде проведено аналіз основних видів полімерних матриць та армувальних матеріалів, а також обґрунтовано доцільність використання обраної комбінації для даної конструкції.

2.1 Аналіз полімерних смол

Полімерна матриця є одним із основних компонентів композиційного матеріалу, оскільки забезпечує об'єднання армувальних волокон у єдину структуру, передачу навантажень між волокнами та захист армувального матеріалу від впливу зовнішнього середовища. Саме властивості смоли значною мірою визначають механічну міцність, жорсткість, тріщиностійкість, теплостійкість та довговічність композитної конструкції.

У виробництві композитних матеріалів використовуються два основних типи полімерних матриць:

- термопластичні полімери;
- термореактивні полімери.

Термопластичні полімери здатні багаторазово переходити у в'язкотекучий стан під дією температури без суттєвого руйнування структури матеріалу. До їх переваг належать висока ударна в'язкість, можливість повторної переробки та добра тріщиностійкість. Проте такі матеріали потребують високих температур

формування та складнішого технологічного обладнання, що обмежує їх застосування у великогабаритних будівельних конструкціях.

Термореактивні полімери після полімеризації формують просторово зшити структуру та більше не можуть бути повторно розплавлені. Саме цей тип полімерів найбільш широко застосовується у конструкційних композитах завдяки високій жорсткості, стабільності властивостей та відносно простій технології виготовлення.

До основних переваг термореактивних полімерів належать:

- висока механічна міцність;
- добра адгезія до армувальних волокон;
- низька повзучість;
- стабільність геометричних розмірів;
- можливість виготовлення великогабаритних конструкцій;
- відносно невисока вартість технологічного обладнання.

Основними недоліками є крихкість після затвердіння та неможливість повторного формування матеріалу після полімеризації.

Для виготовлення композитних конструкцій найбільш поширеними термореактивними смолами є поліефірні, епоксидні та вінілефірні системи. Їхні властивості суттєво відрізняються, що впливає на сферу застосування кожного типу матеріалу.

Поліефірні смоли є найбільш доступними та широко застосовуються у серійному виробництві склопластикових виробів. Основними перевагами таких смол є низька вартість, простота технологічного процесу та швидке затвердіння. Вони не потребують складних умов полімеризації та можуть використовуватись при кімнатній температурі.

Механічні характеристики поліефірних смол є відносно невисокими. Межа міцності при розтягу зазвичай становить 40–90 МПа, модуль пружності — близько 2–4 ГПа, а усадка під час полімеризації може досягати 6–8 %. Значна усадка призводить до виникнення внутрішніх напружень та ризику утворення мікротріщин у готовому виробі. Крім того, поліефірні смоли характеризуються

нижчою стійкістю до циклічних навантажень та меншою адгезією до армувальних волокон у порівнянні з іншими типами смол.

Через відносно низькі механічні характеристики поліефірні смоли переважно використовуються у малонавантажених або декоративних конструкціях, де визначальним фактором є економічність виробництва.

Епоксидні смоли належать до матеріалів із високими експлуатаційними характеристиками та широко застосовуються у відповідальних конструкціях авіаційної, автомобільної та суднобудівної галузей. Вони характеризуються високою адгезією до армувальних волокон, малою усадкою та підвищеною тріщиностійкістю.

Межа міцності епоксидних смол при розтягу становить приблизно 70–120 МПа, модуль пружності 3–5 ГПа, а усадка під час полімеризації зазвичай не перевищує 1–2 %. Низька усадка забезпечує стабільність геометричних розмірів виробу та зменшує рівень внутрішніх напружень у структурі композиту.

До переваг епоксидних смол також належать:

- висока механічна міцність;
- добра втомна стійкість;
- підвищена теплостійкість;
- ефективна робота з вуглецевими волокнами;
- висока довговічність конструкцій.

Основними недоліками епоксидних смол є висока вартість, більша тривалість полімеризації та підвищені вимоги до точності дотримання технологічного процесу.

Вінілефірні смоли займають проміжне положення між поліефірними та епоксидними системами та поєднують переваги обох типів матеріалів. Вони характеризуються достатньо високою міцністю, хорошою хімічною стійкістю та відносно простою технологією переробки.

Межа міцності вінілефірних смол при розтягу зазвичай становить 70–100 МПа, модуль пружності — близько 3–4 ГПа, а усадка під час затвердіння складає приблизно 3–5 %. Крім того, вінілефірні смоли мають високу стійкість до

утворення мікротріщин та кращу втомну довговічність порівняно з поліефірними системами.

Важливою перевагою вінілефірних смол є їх теплостійкість. Температура теплової деформації таких смол зазвичай становить 90–140 °С залежно від конкретного складу та режиму полімеризації. Це дозволяє використовувати їх у конструкціях, які працюють при змінних температурних умовах без суттєвої втрати механічних характеристик.

До основних переваг вінілефірних смол належать:

- висока адгезія до скляних та вуглецевих волокон;
- добра втомна стійкість;
- підвищена тріщиностійкість;
- висока волого- та хімічна стійкість;
- менша усадка порівняно з поліефірними смолами;
- відносно проста технологія виготовлення.

Основними недоліками є:

- вища вартість порівняно з поліефірними смолами;
- більша крихкість у порівнянні з деякими термопластами;
- чутливість до порушення режимів полімеризації.

Для виготовлення балки перекриття у даній роботі обрано саме термореактивну вінілефірну смолу. Такий вибір пояснюється необхідністю забезпечення достатньо високих механічних характеристик конструкції при збереженні прийнятної вартості та технологічності виготовлення.

Важливим фактором вибору є також сумісність вінілефірної смоли з сучасними технологіями виготовлення композитів, зокрема вакуумною інфузією та технологією RTM Light (Resin Transfer Molding Light). Дані технології дозволяють отримувати вироби з низькою пористістю, високою якістю просочення армувальних матеріалів та стабільними механічними характеристиками.

При вакуумній інфузії сухий армувальний матеріал укладається у форму, після чого накривається вакуумним пакетом. Під дією вакууму смола рівномірно

просочується крізь волокна та заповнює форму. Основними перевагами даної технології є низька пористість композиту, висока якість поверхні та можливість виготовлення великогабаритних конструкцій.

Технологія RTM Light передбачає використання жорсткої або напівжорсткої закритої форми, у яку після укладання армувального матеріалу подається смола під невеликим тиском. Такий метод дозволяє отримувати вироби з високою повторюваністю геометрії та стабільними характеристиками.

Вінілефірна смола добре підходить для обох технологій завдяки своїй відносно низькій в'язкості, хорошій змочуваності волокон та достатньо контрольованому часу полімеризації. Це дозволяє забезпечити якісне просочення однонапрямого вуглепластику та склотканини E-glass, що є важливим для формування міцної та довговічної конструкції балки перекриття.

2.2. Аналіз армувальних матеріалів

Армувальні матеріали є основним силовим елементом композиційного матеріалу та визначають його механічні характеристики. Саме волокна сприймають більшу частину навантаження, тоді як полімерна матриця забезпечує передачу напружень між окремими волокнами та формування єдиної структури композиту.

У сучасних композитних конструкціях найбільшого поширення набули скляні, вуглецеві та арамідні волокна. Вибір армувального матеріалу залежить від вимог до міцності, жорсткості, маси, довговічності та вартості конструкції.

Для виготовлення балки перекриття у даній роботі розглядаються скловолоконні та вуглецеві армувальні матеріали, які поєднують високі механічні характеристики з достатньою технологічністю виготовлення. Подальший аналіз присвячено дослідженню їхніх властивостей, переваг та особливостей застосування у несучих композитних конструкціях.

2.2.1. Скловолоконні армувальні матеріали

Скловолокно є одним із найбільш поширених армувальних матеріалів у виробництві композиційних конструкцій. Воно характеризується високою міцністю, відносно малою густиною, стійкістю до корозії та доступною вартістю. Завдяки поєднанню механічних і технологічних властивостей скловолоконні матеріали широко застосовуються у будівництві, суднобудуванні, автомобільній промисловості та виробництві несучих композитних конструкцій.

Основною перевагою скловолокна є його здатність забезпечувати достатньо високі механічні характеристики при значно меншій вартості порівняно з вуглецевими волокнами. Крім того, скловолокно має добру сумісність із більшістю полімерних матриць та характеризується високою стійкістю до вологи й атмосферних впливів.

У композитних матеріалах найчастіше застосовуються E-glass, S-glass та C-glass волокна.

E-glass (Electrical glass) (Рис. 1.5.) є найбільш поширеним типом скловолокна. Воно характеризується хорошими електроізоляційними властивостями, достатньою міцністю та низькою вартістю. Межа міцності E-glass волокон при розтягу становить приблизно 2000–3500 МПа, модуль пружності — 70–76 ГПа, а густина — близько 2,54 г/см³. Основною перевагою E-glass є економічність, проте за жорсткістю та міцністю воно поступається більш сучасним типам скловолокон.

C-glass (Chemical glass) характеризується підвищеною хімічною стійкістю та застосовується переважно у конструкціях, що працюють в агресивних середовищах. Його механічні характеристики є нижчими порівняно з E-glass та S-glass, тому у відповідальних несучих конструкціях C-glass використовується рідше.

S-glass (Structural glass) належить до високоміцних скловолокон та використовується у конструкціях із підвищеними вимогами до міцності та жорсткості. Межа міцності S-glass волокон при розтягу становить приблизно 4500–4800 МПа, модуль пружності — 85–95 ГПа, а густина — близько 2,46 г/см³.

У порівнянні з E-glass даний матеріал має вищу міцність, кращу втомну стійкість та більшу жорсткість при незначному збільшенні вартості.

На основі проведеного аналізу для виготовлення балки перекриття у даній роботі обрано склотканину на основі волокон E-glass. Незважаючи на те, що волокна S-glass мають вищі показники міцності та модуля пружності, їх застосування супроводжується суттєвим збільшенням вартості матеріалу. При цьому основне навантаження у запропонованій конструкції сприйматиметься шарами однонапрямого вуглецевого волокна, тоді як склотканина виконує допоміжну армувальну функцію.

Волокна E-glass характеризуються достатньо високою міцністю, хорошою втомною довговічністю, стійкістю до впливу навколишнього середовища та високою технологічністю. Крім того, вони забезпечують добру адгезію до вінілефірних смол, що сприяє ефективній передачі навантажень між матрицею та армувальним матеріалом.

Застосування E-glass дозволяє знизити вартість конструкції без істотного погіршення її експлуатаційних характеристик. Таке рішення є особливо доцільним для будівельних конструкцій, де важливим фактором виступає співвідношення механічних властивостей та вартості матеріалу.

Окрім типу волокна, важливим фактором є структура армувального матеріалу, оскільки саме вона визначає характер розподілу навантажень у композиті. Найбільш поширеними структурами склотканин є полотняне, саржеве та сатинове плетіння.

Полотняне плетіння характеризується найпростішою структурою, у якій нитки основи та утку почергово переплітаються між собою. Така структура забезпечує високу стабільність тканини та добру рівномірність властивостей, проте має меншу здатність до драпірування складних поверхонь і характеризується більшою хвилястістю волокон, що дещо знижує ефективність сприйняття навантажень.

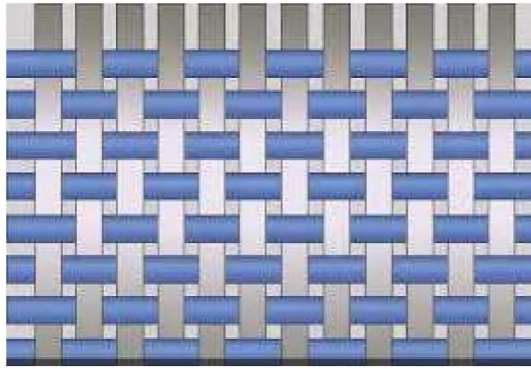


Рисунок 2.2. Схема полотняного плетіння.

Саржеве плетіння має складнішу структуру, у якій нитки переплітаються зі зміщенням. Це забезпечує кращу гнучкість матеріалу, зменшення хвилястості волокон та підвищення механічних характеристик у порівнянні з полотняним плетінням. Такі тканини добре підходять для конструкцій із підвищеними вимогами до міцності.

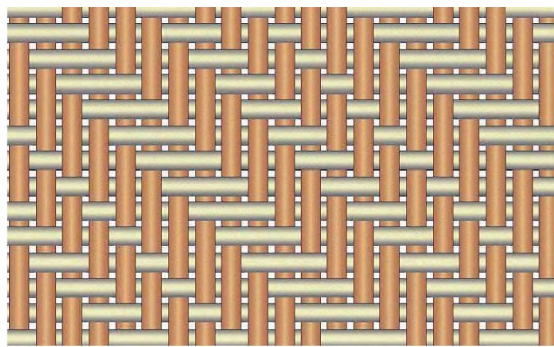


Рисунок 2.3. Схема саржевого плетіння.

Сатинове плетіння характеризується мінімальною хвилястістю волокон та високою щільністю укладання ниток, що дозволяє отримати високі механічні характеристики. Проте сатинові тканини є менш стабільними під час укладання та складнішими у виробництві.

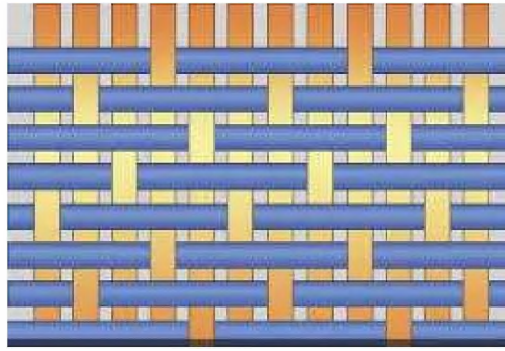


Рисунок 2.4. Схема сатинового плетіння.

Для виготовлення балки перекриття доцільним є використання E-glass тканини із саржевим або близьким до нього типом плетіння, оскільки така структура забезпечує достатню технологічність виготовлення та ефективний розподіл навантажень у конструкції. Використання даного матеріалу дозволяє підвищити тріщиностійкість композиту, покращити роботу балки при локальних навантаженнях та забезпечити додаткову ударну міцність конструкції.

2.2.2. Карбонові армувальні матеріали

Вуглецеві волокна є одним із найбільш ефективних армувальних матеріалів для сучасних композитних конструкцій. Завдяки високій міцності, жорсткості та малій густині вони широко застосовуються в авіаційній, автомобільній, космічній та будівельній галузях. Основною особливістю вуглецевих волокон є їх здатність забезпечувати високі механічні характеристики конструкції при значному зменшенні маси виробу.

Карбонові волокна складаються переважно з атомів вуглецю, орієнтованих у вигляді кристалічних структур уздовж осі волокна. Саме така структура забезпечує високу міцність і жорсткість матеріалу при розтягу.

Основними перевагами вуглецевих волокон є:

- висока межа міцності;
- великий модуль пружності;
- мала густина;
- висока втомна стійкість;
- низький коефіцієнт температурного розширення;

- корозійна стійкість.

У той же час карбонові матеріали мають і певні недоліки:

- висока вартість;
- крихкість при ударних навантаженнях;
- нижча ударна в'язкість порівняно зі скловолокном;
- складніші вимоги до технології виготовлення.

У композитному виробництві найбільш поширеними є високоміцні (High Strength — HS) та високомодульні (High Modulus — HM) вуглецеві волокна.

Високоміцні волокна характеризуються підвищеною межею міцності при дещо меншому модулі пружності. Такі матеріали забезпечують добру роботу конструкції під динамічними та циклічними навантаженнями. Межа міцності HS-волокон зазвичай становить 3500–6000 МПа, модуль пружності — 220–290 ГПа, а густина — близько 1,75–1,90 г/см³.

Високомодульні волокна мають значно більший модуль пружності — до 350–600 ГПа, проте їх межа міцності є нижчою, а сам матеріал стає більш крихким. Такі волокна використовуються переважно у конструкціях, де визначальним параметром є жорсткість.

Для будівельних композитних конструкцій найбільш доцільним є застосування високоміцних карбонових волокон, оскільки вони забезпечують кращу роботу при змінних навантаженнях та мають вищу тріщиностійкість.

Окрім типу волокна, важливе значення має форма армувального матеріалу та орієнтація волокон у композиті. У виробництві композитних конструкцій використовуються ткані карбонові матеріали, мультиаксіальні тканини та однонапрямні волокна (unidirectional).

Ткані карбонові матеріали складаються з переплетених між собою волокон у двох напрямках. Такі тканини забезпечують відносно рівномірний розподіл навантажень та високу стабільність структури, однак через хвилястість волокон їх механічна ефективність є нижчою порівняно з однонапрямні матеріалами.

Мультиаксіальні тканини формуються з декількох шарів волокон, орієнтованих під різними кутами. Вони забезпечують добру роботу конструкції

при складному напруженому стані, проте мають складнішу структуру та більшу товщину.

Однонапрямні матеріали (UD — Unidirectional) складаються з волокон, орієнтованих переважно в одному напрямку. Саме така структура дозволяє максимально ефективно використовувати механічні властивості вуглецевих волокон, оскільки навантаження сприймається безпосередньо вздовж осі армування.

Однонапрямний карбон характеризується:

- максимальною жорсткістю у напрямку волокон;
- високою міцністю при розтягу;
- мінімальною хвилястістю волокон;
- ефективною роботою при згині;
- можливістю локального підсилення конструкції у необхідних напрямках.

Основним недоліком UD-матеріалів є анізотропність властивостей - висока ефективність досягається лише вздовж напрямку орієнтації волокон. Через це у конструкціях часто використовують комбіноване армування із різною орієнтацією шарів.

Для виготовлення балки перекриття у даній роботі обрано саме однонапрямне високоміцне вуглецеве волокно. Такий вибір пояснюється тим, що основні напруження у балці виникають уздовж її поздовжньої осі під час роботи на згин. Використання UD-карбону дозволяє максимально ефективно сприймати розтягувальні та стискальні напруження у поздовжньому напрямку та забезпечує високу жорсткість конструкції при мінімальній масі.

Крім того, поєднання однонапрямного вуглепластику з E-glass склотканиною дозволяє отримати комбінований композит із покращеною тріщиностійкістю та ударною міцністю. У даній конструкції карбонові волокна виконують функцію основного силового армування, тоді як скловолокно забезпечує стабілізацію структури та підвищення стійкості до локальних пошкоджень.

2.3. Висновки до розділу

1. У розділі було проаналізовано основні види армувального волокна і вибрано 2 основні типи:
 - а. Для основного силового армування балки вибрано однонаправлене високоміцне вуглецеве волокно, що дозволяє конструкції максимально ефективно сприймати поздовжні розтягувальні та стискальні напруження при роботі балки на згин.
 - б. Е-скловолокно, що характеризується хорошою ударною в'язкістю, корозійною стійкістю та відносно невисокою вартістю. Використання E-glass дозволяє забезпечити необхідну міцність конструкції при значно меншій вартості порівняно з високоміцними типами скловолокна.
2. В якості сполучника для виготовлення балки перекриття було вибрано термореактивну вінілефірну смолу, оскільки вона забезпечує необхідну міцність конструкції, гарну адгезію до армувальних матеріалів, підвищену тріщиностійкість та стійкість до динамічних навантажень. Додатковою перевагою є сумісність даної смоли з технологіями вакуумної інфузії та RTM Light, що дозволяє отримати композит із низькою пористістю та стабільними механічними характеристиками.

					КР.134.4161.05.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 3			Літ.	Арк.	Аркушів	
Студент		Соломонюк А.Д.								37	11
Керівник		Юреско Т.А.									
Н. контр.		Захарова І.О.									
Зав. каф.		Бобров М.М.						НУК			

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ НАВАНТАЖЕНЬ НА БАЛКУ ПЕРЕКРИТТЯ.

3.1. Зовнішні навантаження на балку

3.1.1. Вертикальні навантаження на балку.

Розрахуємо момент та перерізуючі сили для балки перекриття з довжиною прольоту $l=5$ м від дії снігу, власної ваги балки та ваги даху.

$$q_1 = p_s * b + p_g + p_{ed} * b = 379.176 \text{ Н/м} \quad (3.1)$$

де q_1 – снігове навантаження; $b = 0,15$ м – ширина балки, $p_s = 1800$ Па – вага снігового покриву, $p_g = 34,176$ кг – власна вага балки, $p_{ed} = 500$ Па – вага даху (до цього значення також входить утеплення, гідроізоляція та внутрішня обшивка даху).

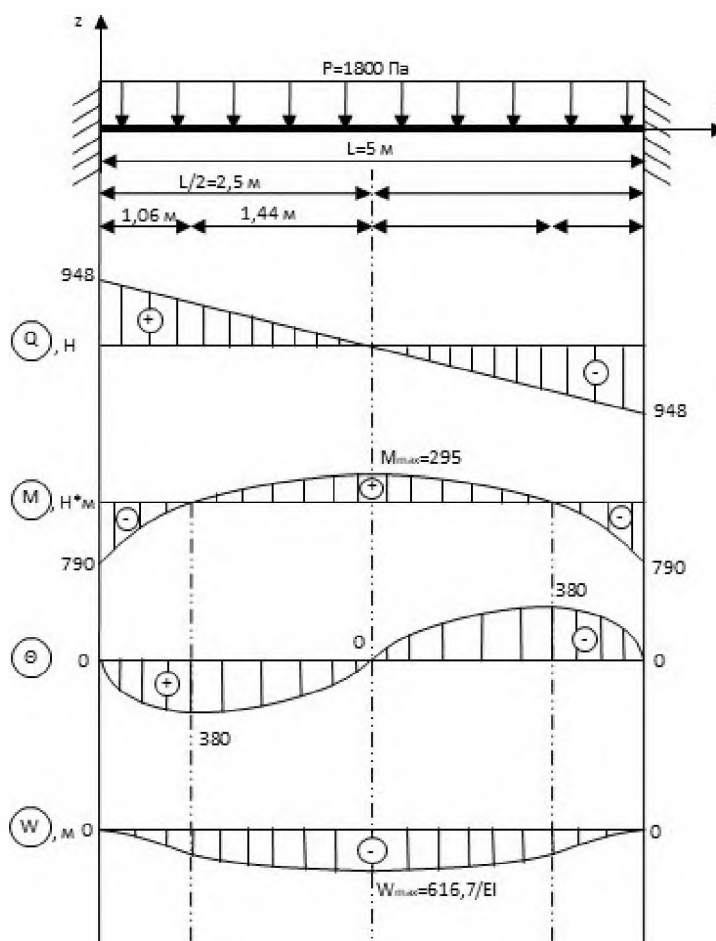


Рисунок 3.1. Епюри вертикальних навантажень

Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата
------	------	-------------	--------	------

КР.134.4161.05.ПЗ.03

Лист

38

$$Q_{A/B} = \pm \frac{q \cdot l^2}{2} = \pm 947.94 \text{ Н}; \quad (3.2)$$

$$M_A = -\frac{q \cdot l^2}{12} = -789.95 \text{ Н/м}; \quad (3.3)$$

$$M_B = -M_A$$

$$M_C = \frac{q \cdot l^2}{24} = 394.98 \text{ Н/м} \quad (3.4)$$

Для знаходження значення прогину балки використовуємо рівняння Бубнова та інтегруємо його:

$$Q(x) = Q_A - q \cdot x$$

$$M(x) = M_A + Q_A \cdot x + \frac{q \cdot x^2}{2}$$

$$\theta(x) = M_A \cdot x + R_A \cdot \frac{x^2}{2} - \frac{q \cdot x^3}{6} \quad (3.5)$$

$$x_1 = 0; \quad x_2 = 1.056 \text{ м}; \quad x_3 = 2.5 \text{ м}$$

$$\theta(x_1) = 0; \quad \theta(x_2) = -380; \quad \theta(x_3) = 0$$

$$w(x) = \frac{M_A \cdot x^2}{2} + \frac{R_A \cdot x^3}{6} - \frac{q \cdot x^4}{24} \quad (3.6)$$

$$w(x) = \frac{-616.7}{EI} \text{ м}$$

У жорсткому защемленні θ_0 та w_0 рівні 0, тому у рівнянні вони опускаються.

Таблиця 3.1. Небезпечні перерізи в конструкції у площині zx

Переріз	Q, Н	M, Н/м	W*EI, м
A	948	-790	0
C	0	295	-616,7
B	-948	-790	0

3.1.2. Горизонтальні навантаження на балку.

Розрахуємо момент та перерізуючі силу для довжини прольоту $l=5$ м від дії вітру за формулами (3.1) – (3.6).

$$q_2 = 90 \text{ Н/м}; \quad Q = \pm 225 \text{ Н/м}; \quad M_A = -187.5 \text{ Н/м}; \quad M_B = -M_A;$$

$$M_C = 93.75 \text{ Н/м}; \quad \theta(x_1) = 0; \quad \theta(x_2) = -90,2; \quad \theta(x_3) = 0;$$

$$w(x^3) = \frac{-14,4}{EI} \text{ м}$$

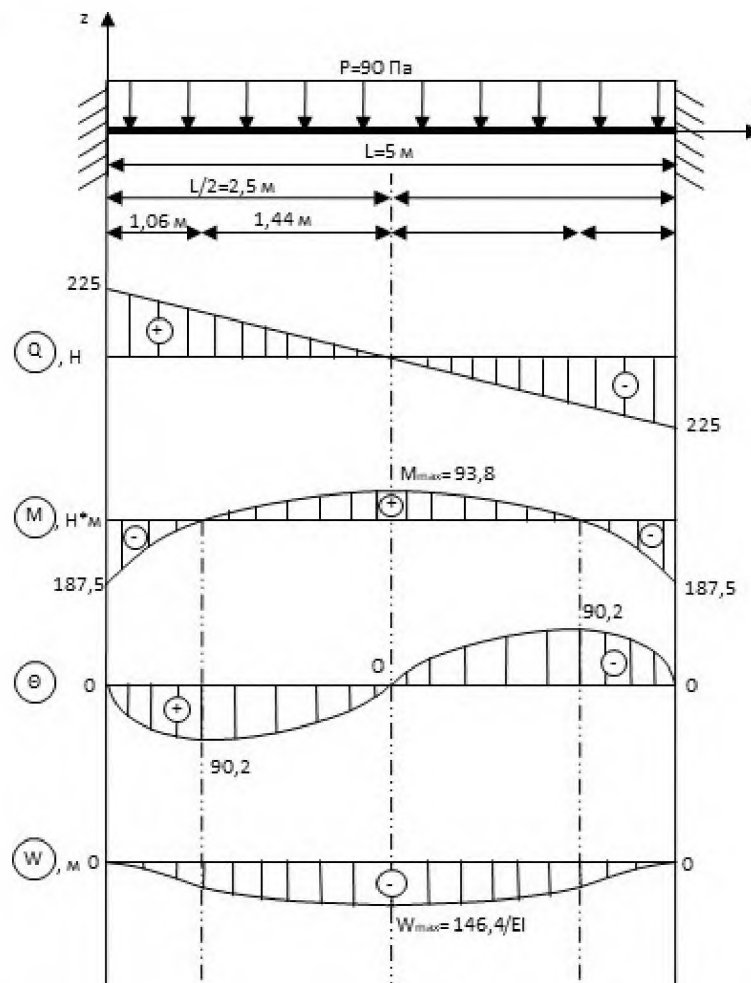


Рисунок 3.2. Епюри горизонтальних навантажень

Таблиця 3.2. Небезпечні перерізи в конструкції у площині ху

Переріз	Q, Н	M, Н/м	w·EI, м
A	225	187,5	0
C	0	93,8	-146,4
B	-225	187,5	0

3.1.3. Сумарні значення.

Так як небезпечні перерізи вертикальних і горизонтальних навантажень на балку збігаються, за допомогою знайдених значень перерізуючих сил, моменту та прогину балки перекриття розраховуємо сумарні значення. Розрахунок відбувається за формулою сумми векторів.

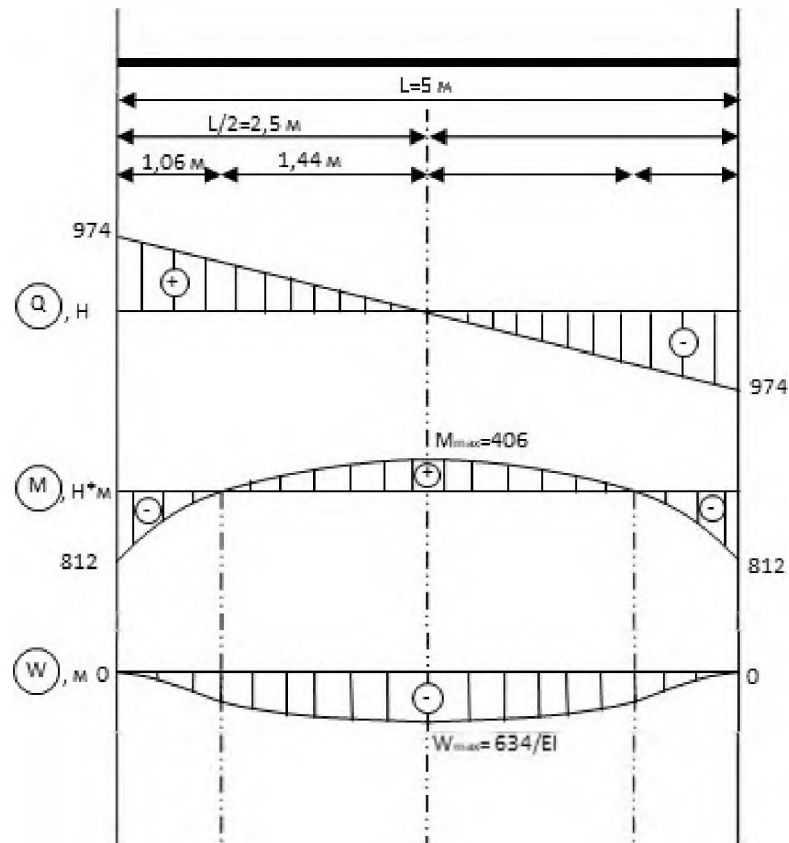


Рисунок 3.3. Епюри небезпечних навантажень

Таблиця 3.3. Сумарні характеристики в небезпечних перерізах балки перекриття.

Переріз	Q, Н	M, Н/м	W*EI, м
A	974	-812	0
C	0	406	634
B	-974	812	0

3.2. Розрахунок міцності та жорсткості композиційного матеріалу

Оскільки матеріал є анізотропним, складається з певної кількості шарів, для нього необхідно розрахувати фізико-механічні характеристики. Це робиться за допомогою методу послідовного наближення.

На початку розрахунку кількість шарів вибирається по технологічному принципу.

Таблиця 3.4. Матеріали, використані для формування пакету композитної балки.

Матеріал	Призначення	Кількість шарів
Мультиаксіальна склотканина Е-класу	Покращення ударних властивостей та підкріплення напрямку з максимальними дотичними напруженнями	4
Однонапрямна вуглецева тканина	Забезпечення поздовжньої жорсткості та міцності балки-перекриття	2

Характеристики армуючих матеріалів, наведених у таблиці 3.4., та сполучника наведені нижче у таблиці 3.5. - 3.7.

Таблиця 3.5. Властивості мультиаксіального скла Е класу Hexcel HiMax 600,

Орієнтація волокон	+45/-45
Товщина композиту, t_s мм	0.55
Густина, кг/м^3	1900
Модуль пружності, Е, ГПа	30
Модуль зсуву, G, ГПа	5
Межа міцності при розтягу, σ_p , МПа	550
Межа міцності при згині, σ_z , МПа	600
Межа міцності при стиску, σ_c , МПа	450

Таблиця 3.6. Властивості однонапрямого вуглепластику Toogay T300.

Товщина композиту, t_c мм	0.3
Густина, кг/м^3	1760
Модуль пружності, E , ГПа	132
Модуль зсуву, G , ГПа	125
Межа міцності при розтягу, σ_p , МПа	1760
Межа міцності при згині, σ_z , МПа	125
Межа міцності при стиску, σ_c , МПа	1570

Таблиця 3.7. Властивості вінілефірної смоли АМЕ 5000 Т-30

В'язкість, $\text{мПа}\cdot\text{с}$	300
Модуль пружності, E , ГПа	3.4
Модуль пружності при згині, E_z , ГПа	2.7
Межа міцності при розтягу, σ_p , МПа	57
Межа міцності при згині, σ_z , МПа	101
Термостійкість, T , $^{\circ}\text{C}$	110

Данна балка перекриття має коробчастий профіль, вид якого представлений з розмірами на рисунку 3.4.

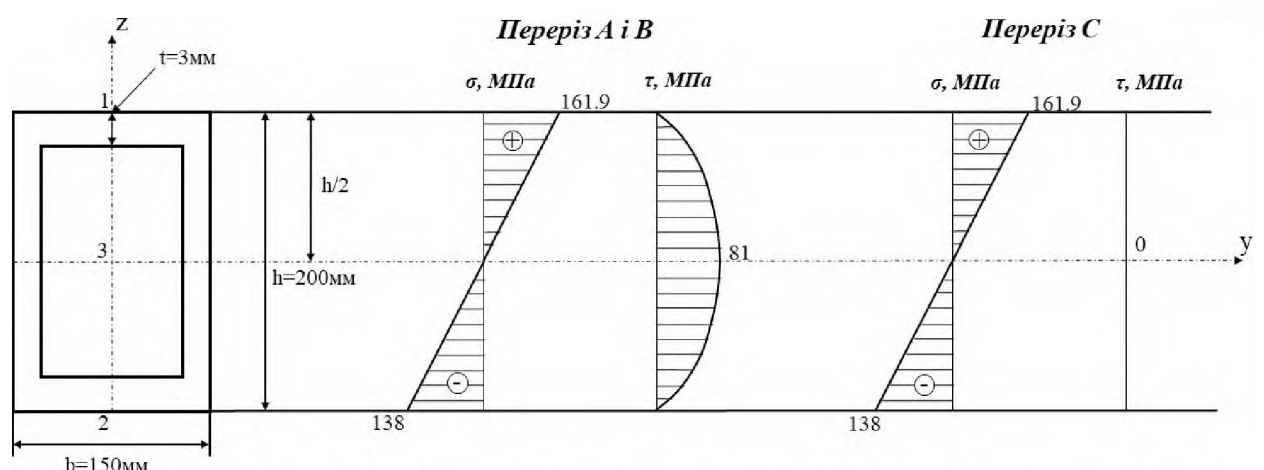


Рисунок 3.4. Переріз балки перекриття та внутрішні напруження у небезпечних перерізах.

Розраховуємо товщину пакету t .

$$t = n_1 * t_s + n_2 * t_c = 0.003 \text{ м}$$

$$B = b - 2t = 0.144 \text{ м}$$

$$H = h - 2t = 0.194 \text{ м}$$

Геометричні характеристики перерізу.

$$\text{Площа перерізу: } S = b * h - B * H = 0.002 \text{ м}$$

$$\text{Момент інерції балки відносно осі у: } I_y = \frac{b * h^3 - B * H^3}{12} = 1.16 * 10^{-5} \text{ м}^4$$

$$\text{Момент опору балки відносно осі у: } W_y = \frac{2I}{h} = 1.16 * 10^{-4} \text{ м}^3$$

3.2.1. Розрахунок фізико-механічних характеристик пакету КМ.

Модуль пружності для пакету розраховується за формулою з літератури

$$\text{№15: } E = \frac{1}{t} (E_c * n_c * t_c * \cos^2 0^\circ + E_s * n_s * t_s * \cos^2 0^\circ)$$

де E_c – модуль пружності карбону, n_c – кількість шарів карбону, t_c – товщина карбонової тканини, E_s – модуль пружності склопластику, n_s – кількість шарів склопластику, t_s – товщина склопластикової тканини.

$$E = \frac{1}{t} (132 * 2 * 0,3 * 10^{-3} * \cos^2 0^\circ + 30 * 4 * 0,55 * 10^3 * \cos^2 0^\circ) = 51,9 \text{ ГПа}$$

Міцність на розтяг для пакету розраховується за формулою з літератури №15:

$$\sigma_p = \frac{1}{0,003} (\sigma_{pc} * n_c * t_c * \cos^2 0^\circ + \sigma_s * n_{ps} * t_s * \cos^2 0^\circ)$$

де σ_{pc} – межа міцності карбону при розтягу, σ_{ps} – межа міцності склопластику при розтягу.

$$\begin{aligned} \sigma_p &= \frac{1}{0,003} (1760 * 2 * 0,3 * 10^{-3} * \cos^2 0^\circ + 550 * 4 * 0,55 * 10^3 * \cos^2 0^\circ) \\ &= 809,2 \text{ МПа} \end{aligned}$$

Міцність на стискання для пакету розраховується за формулою з літератури №15:

$$\sigma_c = \frac{1}{t} (\sigma_{cc} * n_c * t_c * \cos^2 0^\circ + \sigma_{cs} * n_s * t_s * \cos^2 0^\circ)$$

де σ_{cc} – межа міцності карбону при стисненні, σ_{cs} – межа міцності склопластику при стисненні.

$$\sigma_c = \frac{1}{0,003} (1570 * 2 * 0,3 * 10^{-3} * \cos^2 0^\circ + 450 * 4 * 0,55 * 10^3 * \cos^2 0^\circ) = 690 \text{ МПа}$$

Міцність на згин для пакету розраховується за формулою з літератури №15:

$$\sigma_z = \frac{w_s}{w_y}$$

де w_s – сумарне зрачення прогину балки, w_y – момент опору балки.

$$\sigma_z = \frac{634}{1,16 * 10^{-4}} = 5,5 \text{ МПа}$$

3.2.2. Перевірка міцності та жорсткості розрахованого пакету.

1. Перевірка жорсткості.

Максимальний вигин балки розташований у перерізі С (табл. 3.3.) та вираховується за формулою:

$$w_{max} = \frac{w_s}{E * 10^9 * I_y} = 0,001 \text{ м} < [w] = \frac{L}{300} = 0,017 \text{ м}$$

Умова жорсткості виконується.

2. Перевірка міцності балки.

Перевірка міцності балки виконується у небезпечних перерізах А, В, С (див. табл. 3.3.)

Перерізи А і В (жорстке закріплення) (див. рис. 3.4):

а) Нормальні напруження.

Максимальні та мінімальні нормальні напруження ($\sigma_{max} = |\sigma_{min}|$) знаходяться у точках 1 та 2.

$$\sigma_{max} = \frac{M_A}{w_y} = 7 \text{ МПа} < [\sigma] = \frac{\sigma_p}{5} = 161,9 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{min} = 7 \text{ МПа} < [\sigma] = \frac{\sigma_c}{5} = 138 \text{ МПа}$$

б) Дотичні напруження.

Максимальне дотичне напруження знаходиться у точці 3.

$$\tau_{max} = \frac{Q \cdot S}{b \cdot I} = 27 \text{ кПа} < [\tau] = \frac{\sigma_p}{10} = 81 \text{ МПа}$$

Переріз C (див. рис. 3.4):

а) Нормальні напруження.

Максимальні та мінімальні нормальні напруження ($\sigma_{max} = |\sigma_{min}|$) знаходяться у точках 1 та 2.

$$\sigma_{max} = \frac{M_A}{W_y} = 3.5 \text{ МПа} < [\sigma] = \frac{\sigma_p}{5} = 161,9 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{min} = 3.5 \text{ МПа} < [\sigma] = \frac{\sigma_c}{5} = 138 \text{ МПа}$$

а) Дотичні напруження.

Максимальне дотичне напруження знаходиться у точці 3. $Q=0$

$$\tau_{max} = \frac{Q \cdot S}{b \cdot I} = 0 < [\tau] = \frac{\sigma_p}{10} = 81 \text{ МПа}$$

Умови міцності виконуються.

3. Перевірка напружень при міжшаровому зсуві.

За формулою 3.7.[□] розраховуємо міжшарові напруження у пакеті.

$$\tau_{xy}^{(1,2)} = -\frac{Q}{2bD} (E_s(t_1 - t_0)(t_1 + t_0) + E_c(t_2 - t_1)(t_2 + t_1)) = 1.8 \cdot 10^5 \text{ Па} \approx$$

$$0,18 \text{ МПа} < \tau_m = 30 \text{ МПа} \quad (3.7)$$

$$\tau_{xy}^{(2,3)} = -\frac{Q}{2bD} (E_c(t_2 - t_1)(t_2 + t_1) + E_s(t_3 - t_2)(t_3 + t_2)) = -2.6 \cdot$$

$$10^6 \text{ Па} \approx -2.6 \text{ МПа} < \tau_m = 30 \text{ МПа}$$

$$\tau_{xy}^{(3,4)} = -\frac{Q}{2bD} (E_s(t_3 - t_2)(t_3 + t_2) + E_s(t_4 - t_3)(t_4 + t_4)) = 6.1 \cdot 10^4 \text{ Па} \approx$$

$$0,06 \text{ МПа} < \tau_m = 30 \text{ МПа}$$

$$\tau_{xy}^{(4,5)} = \tau_{xy}^{(2,3)}$$

$$\tau_{xy}^{(5,6)} = \tau_{xy}^{(1,2)}$$

Умови зсувної міцності виконуються.

3.3. Висновки до розділу

1. Виконано розрахунок навантажень, що діють на балку перекриття, та проведено оцінку її напружено-деформованого стану. Враховано основні типи

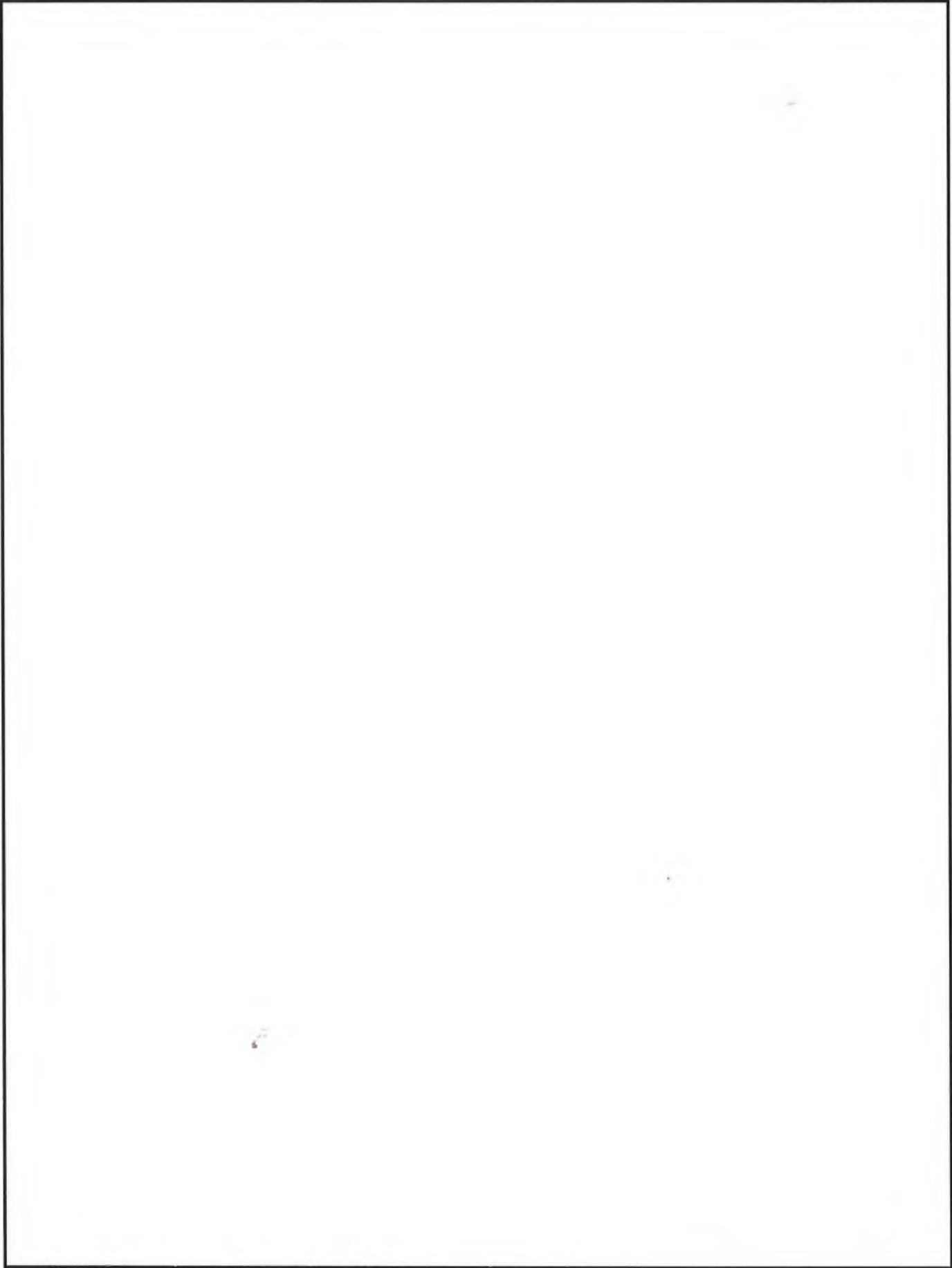
					КР.134.4161.05.ПЗ.03	Лист
						46
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

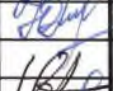
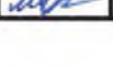
навантажень: вертикальні (власна вага конструкції, покрівля, снігове навантаження) та горизонтальні (вітровий тиск).

2. Встановлено, що максимальні зусилля виникають у центральній частині прольоту та в зонах закріплення конструкції. Визначено розрахункові значення поперечних сил, згинальних моментів і прогинів у найбільш навантажених перерізах балки.

3. На основі отриманих результатів сформовано вихідні дані для підбору структури композитного пакета та подальшої оцінки міцності балки. З урахуванням анізотропії композитного матеріалу підготовлено основу для визначення фізико-механічних характеристик багатошарової конструкції методом послідовних наближень.

4. Підтверджено можливість застосування комбінованої композитної балки коробчастого типу для заданих експлуатаційних навантажень, що також слугує базою для розроблення технології її виготовлення.



					КР.134.4161.05.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 4				
Студент		Соломонюк А.Д.							
Керівник		Юреско Т.А.							
									
Н. контр.		Захарова І.О.							
Зав. каф.		Бобров М.М.			НУК				

Літ.	Арк.	Аркушів
	48	15

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ТА ВИРОБУ З НЬОГО

4.1 Аналіз технологій виготовлення композитних конструкцій

Виготовлення конструкцій із полімерних композиційних матеріалів здійснюється різними технологічними методами, вибір яких залежить від геометрії виробу, вимог до механічних характеристик, серійності виробництва та економічної доцільності. Для виробництва несучих будівельних елементів особливого значення набувають технології, що забезпечують високу якість просочення армувального наповнювача, стабільність властивостей готового виробу та можливість отримання конструкцій значних розмірів.

До найбільш поширених технологій виготовлення композиційних конструкцій належать ручне формування (Hand Lay-Up), вакуумна інфузія, класичне RTM-формування (Resin Transfer Molding), та технологія RTM Light.

Технологія ручного формування є однією з найпростіших та найдешевших. Вона полягає у пошаровому укладанні армувального матеріалу у відкриту форму з подальшим просоченням смолою вручну. Основними перевагами методу є простота обладнання та низькі початкові витрати. Однак ручне формування характеризується значною залежністю якості виробу від кваліфікації персоналу, нерівномірним вмістом смоли та підвищеною ймовірністю утворення пор і повітряних включень. Через це технологія малопридатна для виготовлення відповідальних несучих конструкцій.

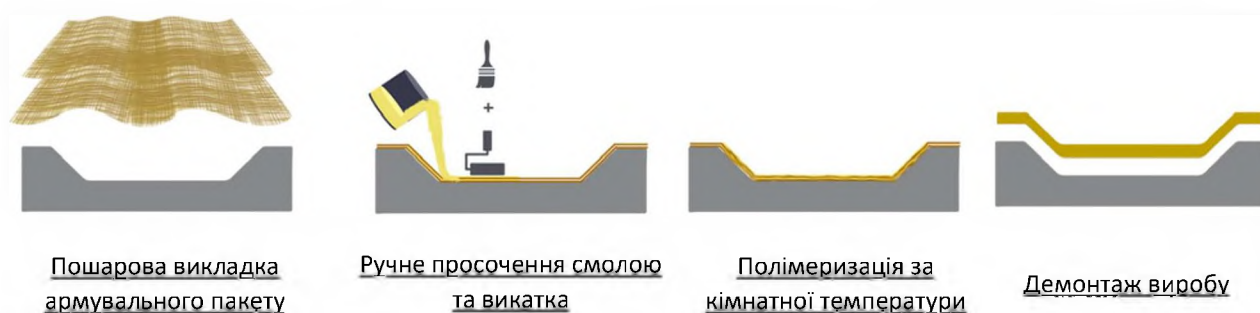


Рисунок 4.1. Процес виготовлення виробу шляхом ручного формування.

Вакуумна інфузія є більш досконалим методом формування композитів. Під час процесу сухий армувальний пакет розміщується на формі та герметизується вакуумним мішком. Після створення вакууму смола під дією перепаду тиску надходить у пакет і просочує армувальний матеріал. Дана технологія дозволяє отримати вироби з низькою пористістю та більш стабільним співвідношенням волокна і матриці порівняно з ручним формуванням. Разом із тим вакуумна інфузія потребує ретельного проектування системи подачі смоли, а при виготовленні виробів складної конфігурації можуть виникати труднощі із забезпеченням рівномірного просочення.

Рисунок 4.2. Процес виготовлення виробу шляхом вакуумної інфузії



Класична технологія RTM передбачає розміщення армувального пакета між двома жорсткими половинами форми. Після закриття форми смола подається всередину під певним тиском, забезпечуючи повне просочення армувального матеріалу. Метод дозволяє отримувати вироби з високою точністю геометричних розмірів, якісною поверхнею та стабільними механічними характеристиками. Недоліком технології є висока вартість металевих прес-форм і обладнання для нагнітання смоли, що обмежує її застосування при виготовленні великогабаритних конструкцій або дослідних зразків.

Проміжне положення між вакуумною інфузією та класичним RTM займає технологія RTM Light. Вона поєднує використання жорсткої форми з одного боку та гнучкої або напівжорсткої вакуумної кришки з іншого. Після укладання сухого армувального пакета форма герметизується, створюється вакуум, а смола подається в порожнину форми під дією різниці тисків. Такий підхід дозволяє

отримати якісне просочення армувального матеріалу, забезпечити контроль товщини виробу та знизити витрати на оснащення порівняно з класичним RTM.

Рисунок 4.3. Процес виготовлення виробу шляхом RTM

З огляду на конструкцію розроблюваної композитної балки, вимоги до її



механічних характеристик та необхідність забезпечення якісного просочення комбінованого армувального пакета зі скляних і вуглецевих волокон, для виготовлення виробу обрано технологію RTM Light. Даний метод забезпечує достатньо високу якість готового виробу, дозволяє отримати стабільну товщину композитного пакета та не потребує використання дорогого пресового обладнання. Крім того, технологія добре підходить для виготовлення довгомірних будівельних елементів, до яких належить розроблювана балка перекриття.

4.2 Вибір формоутворюючої оснастки для виготовлення балки

Формоутворююча оснастка є ключовим елементом технології RTM Light, оскільки саме вона визначає геометрію виробу, точність розмірів, якість поверхні та стабільність процесу просочення армувального пакета. Від конструкції форми залежить рівномірність розподілу смоли, можливість контролю товщини виробу та відсутність дефектів типу сухих зон або пористості.

Для виготовлення композитної балки обрано жорстку односторонню форму (матрицю) з вакуумною герметизуючою кришкою, що є типовим рішенням для технології RTM Light. Така схема поєднує переваги жорсткого

формоутворення та вакуумного притиску, забезпечуючи високу якість просочення при відносно невисокій вартості оснащення.

1) Конструкція нижньої форми (матриці)

Нижня частина оснастки виконується у вигляді жорсткої матриці з точно відтвореним профілем половини поперечного перерізу балки. Вона визначає зовнішню геометрію виробу та забезпечує точність його розмірів.

Матриця повинна відповідати таким вимогам:

- висока геометрична точність і стабільність розмірів;
- достатня жорсткість для виключення деформацій під вакуумом;
- термостійкість при режимах полімеризації смоли;
- хімічна стійкість до вінілефірної смоли та розділювальних засобів;
- гладкість робочої поверхні для отримання якісної зовнішньої поверхні виробу.

Як матеріал для виготовлення матриці доцільно застосовувати:

- алюмінієві сплави (при середніх серіях виробництва);
- сталь (для високої точності та довговічності);
- або епоксидні композитні форми з наповнювачем (для дослідних та одиничних виробів).

З огляду на лабораторний або дослідний характер виготовлення балки, найбільш раціональним є використання композитної або алюмінієвої форми, оскільки вони забезпечують баланс між вартістю та точністю.

2) Вакуумна верхня система (кришка)

Верхня частина оснастки виконується у вигляді гнучкої або напівжорсткої вакуумної кришки. Вона не формує жорстку геометрію, але створює необхідний тиск для ущільнення пакета та забезпечення рівномірного просочення смолою.

До складу вакуумної системи входять:

- вакуумний мішок або силіконова мембрана;
- герметизуючий контур (ущільнювач);

					КР.134.4161.05.ПЗ.04	Лист
						52
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

- вакуумні магістралі для відкачування повітря;
- канали подачі смоли (інжекційні та дренажні лінії).

Гнучка система дозволяє компенсувати невеликі відхилення товщини армувального пакета та забезпечує рівномірний тиск по всій поверхні виробу, що особливо важливо для довгомірної балки.

3) Система подачі смоли та вакуумування

Для забезпечення якісного просочення використовується комбінована система:

- вакуум створює перепад тиску та видаляє повітря з порожнини форми;
- смола подається через інжекційні канали у нижній або торцевій частині форми.

Розташування точок подачі та відводу смоли повинно забезпечувати рівномірний фронт просочення без утворення «сухих зон». Для балки витягнутої форми доцільним є поздовжнє спрямування потоку смоли вздовж довжини виробу.

4) Розділювальна система та підготовка поверхні

Для забезпечення легкого вилучення готового виробу форма обробляється розділювальними системами, що запобігають адгезії смоли до поверхні матриці. Застосовуються:

- воскові розділювачі;
- напівпостійні полімерні покриття;
- комбіновані системи (грунт + віск).

Якість підготовки поверхні безпосередньо впливає на зовнішній вигляд виробу та довговічність оснастки.

5) Обґрунтування вибору оснастки

Вибрана схема «жорстка нижня форма + вакуумна верхня система» є оптимальною для виготовлення довгомірної композитної балки, оскільки:

					КР.134.4161.05.ПЗ.04	Лист
						53
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

- забезпечує стабільну геометрію перерізу;
- дозволяє контролювати товщину виробу;
- зменшує ризик пористості та непросочених зон;
- є значно дешевшою за класичну двосторонню RTM-форму;
- добре адаптується під комбіновані армувальні пакети (скло + карбон).

Таким чином, обрана формоутворююча система забезпечує необхідну якість виробу при збереженні технологічної та економічної ефективності процесу RTM Light.

4.3 Розробка структури армувального пакета

Структура армувального пакета є одним із визначальних факторів, що формують механічні характеристики композитної балки. Від правильного підбору послідовності шарів, їх орієнтації та взаємного розташування залежить здатність конструкції сприймати згинальні, зсувні та локальні навантаження, а також її стійкість до розшарування.

Для розроблюваної балки прийнято комбіновану схему армування, що включає скляні біаксіальні шари та однонаправлені вуглецеві шари. Така структура дозволяє раціонально розподілити функції між матеріалами: вуглецеві шари сприймають основні нормальні напруження при згині, а скляні шари забезпечують роботу на зсув і підвищують міжшарову міцність.

1) Загальні принципи компонування пакета

При формуванні пакета враховуються такі принципи:

- симетричність відносно середньої площини для зменшення залишкових напружень;
- чергування шарів різної природи для підвищення стійкості до розшарування;
- розташування високомодульних шарів ближче до зовнішніх поверхонь;

- забезпечення достатньої кількості шарів, що сприймають зсувні навантаження;
- технологічність укладання в умовах RTM Light.

Симетрична структура також дозволяє уникнути викривлення балки після полімеризації, що є важливим для довгомірних конструкцій.

2) Прийнята схема армувального пакета та функціональне призначення шарів

Для виготовлення балки прийнято шестишаровий пакет із такою послідовністю:

Таблиця 4.1. Прийнята схема армувального пакета.

№ шару	Матеріал	Орієнтація
1	Біаксіальна склотканина	+45° / -45°
2	Однонапрямний вуглепластик	0°
3	Біаксіальна склотканина	+45° / -45°
4	Біаксіальна склотканина	+45° / -45°
5	Однонапрямний вуглепластик	0°
6	Біаксіальна склотканина	+45° / -45°

Кожен шар виконує окрему конструктивну роль:

- Зовнішній скляний шар: Забезпечує захист конструкції від зовнішніх впливів, підвищують ударну в'язкість та формують якісну поверхню виробу.
- Внутрішні скляні шари (3 і 4): Сприймають зсувні напруження, стабілізують роботу пакета при поперечному навантаженні та підвищують опір розшаруванню.
- Карбонові шари (2 і 5): Розташовані ближче до нейтральної осі з урахуванням симетрії пакета, вони ефективно сприймають поздовжні нормальні напруження при згині та забезпечують високу жорсткість балки.

3) Обґрунтування орієнтації волокон

Орієнтація волокон у шарах вибрана з урахуванням характеру навантажень:

- 0° (карбонові шари) — основна несуча напрямлена орієнтація, що відповідає поздовжній осі балки. Саме ці шари забезпечують максимальну згинальну жорсткість і міцність.
- $\pm 45^\circ$ (скляні шари) — оптимальна орієнтація для сприйняття зсувних напружень, які виникають у стінках балки при дії поперечних сил.

Таке поєднання орієнтацій дозволяє отримати збалансовану роботу композиту в умовах складного напруженого стану.

4) Конструктивна логіка пакета

Запропонована структура пакета є компромісом між:

- високою жорсткістю (завдяки карбону),
- тріщиностійкістю та зсувною міцністю (завдяки склу),
- технологічністю виготовлення методом RTM Light.

Симетричне розташування шарів відносно центральної площини також мінімізує ризик викривлення після твердіння та забезпечує стабільність геометрії балки.

4.4 Розробка технологічного процесу формування балки методом RTM Light

Технологічний процес виготовлення композитної балки методом RTM Light включає послідовність операцій з підготовки оснастки, укладання армувального пакета, герметизації форми, інжекції смоли та подальшої

					КР.134.4161.05.ПЗ.04	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		56

полімеризації. Основною особливістю даного методу є поєднання жорсткої формоутворюючої матриці та вакуумної системи, що забезпечує контрольований процес просочення сухого армувального пакета.

Метою технологічного процесу є отримання двох половин композитної балки з рівномірним розподілом смоли, мінімальною пористістю та стабільними геометричними параметрами. Процес формування розглядатиметься на прикладі виготовлення однієї половини балки, так як друга половина має симетричну форму та технологію виготовлення.

1) Підготовка оснастки

Перед початком формування виконується підготовка нижньої форми (матриці):

- очищення робочої поверхні від залишків попередніх циклів;
- контроль геометрії та відсутності дефектів поверхні;
- нанесення розділювального шару (віск, напівпостійне покриття або комбінована система);
- встановлення інжекційних і вакуумних магістралей;
- перевірка герметичності вакуумної системи.

Якість підготовки оснастки безпосередньо впливає на якість поверхні готового виробу та стабільність процесу просочення.

2) Підготовка армувальних матеріалів

Армувальні матеріали готуються відповідно до заданої структури пакета:

- розкрій склотканини та вуглецевого матеріалу за шаблонами;
- контроль орієнтації волокон (0° та $\pm 45^\circ$);
- маркування шарів для забезпечення правильної послідовності укладання;
- зберігання матеріалів у сухих умовах для запобігання зволоженню.

Особлива увага приділяється точності розкрою, оскільки зміщення волокон може призвести до зниження механічних характеристик готової балки.

					КР.134.4161.05.ПЗ.04	Лист
						57
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

3) Укладання армувального пакета

Укладання виконується послідовно відповідно до прийнятої структури пакета (див. розділ 4.3):

- встановлення першого шару біаксіальної склотканини;
- укладання першого шару однонаправленого карбону;
- монтаж наступних скляних шарів;
- укладання другого карбонового шару;
- завершення пакета зовнішнім скловолоконним шаром.

Під час укладання забезпечується щільне прилягання шарів до поверхні форми без складок, повітряних включень та локальних перекосів.

4) Герметизація та вакуумування форми

Після укладання пакета форма герметизується вакуумною системою:

- встановлення вакуумної плівки або жорсткої кришки;
- ущільнення контурів герметиком;
- підключення вакуумних і смоляних ліній;
- перевірка герметичності системи (вакуум-тест).

Після досягнення герметичності створюється вакуум, що дозволяє видалити повітря з порожнини форми та ущільнити армувальний пакет перед інжекцією смоли.

5) Приготування та підготовка смоли

Вінілефірна смола готується безпосередньо перед інжекцією:

- змішування смоли з ініціатором (затверджувачем) у заданій пропорції;
- ретельне перемішування до однорідного стану;
- дегазація смоли (видалення повітряних бульбашок) під вакуумом;
- контроль в'язкості та часу гелеутворення (pot life).

Підготовка смоли виконується з урахуванням часу, необхідного для повного заповнення форми без передчасного затвердіння.

6) Інжекція смоли (просочення пакета)

Процес просочення виконується під дією вакууму:

- смола подається через інжекційні канали;
- повітря відводиться через вакуумні лінії;
- смола рівномірно заповнює порожнину форми;
- контроль фронту просочення здійснюється візуально або через прозорі ділянки магістралей.

Рух смоли організовується таким чином, щоб уникнути утворення сухих зон та забезпечити рівномірне насичення всього армувального пакета.

7) Полімеризація (затвердіння)

Після завершення інжекції система залишається під вакуумом до початку гелеутворення смоли – 30 хвилин. Далі виріб затверджується впродовж 6 годин за температури 100°C.

8) Виймання виробу та контроль якості

Після завершення твердіння виконується:

- Зниження температури матриці до температури навколишнього середовища;
- демонтаж вакуумної системи;
- вилучення балки з форми;
- обрізка технологічних припусків;
- візуальний контроль поверхні;
- перевірка на наявність пор, розшарувань і дефектів;
- контроль геометричних розмірів.

У разі необхідності можуть додатково застосовуватися неруйнівні методи контролю (ультразвукова дефектоскопія або візуально-акустичні методи).

9) Підсумок процесу

Розроблений технологічний процес RTM Light забезпечує отримання двох половинок композитної балки з високою якістю просочення, стабільною

					КР.134.4161.05.ПЗ.04	Лист
						59
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

структурою армування та відтворюваною геометрією. Використання вакуумної системи в поєднанні з контрольованою інжекцією смоли дозволяє мінімізувати пористість та забезпечити необхідні експлуатаційні характеристики конструкції.

4.5 Механічна обробка, склейка та доведення композитної балки

Після завершення процесу полімеризації отримані вироби потребують механічної обробки для приведення їх до заданих геометричних розмірів, видалення технологічних припусків та підготовки поверхонь до склейки, експлуатації або подальшого монтажу.

Композитні матеріали мають специфіку обробки, пов'язану з їх шаруватою структурою, різною твердістю компонентів (волокна та матриця) та схильністю до локального розшарування при неправильному виборі режимів різання.

1) Обрізка технологічних припусків

Після вилучення з форми виріб має технологічні напуски смоли та армувального матеріалу по краях. Їх видалення виконується:

- дисковими пилами з твердосплавними або алмазними напайками;
- стрічковими пилами з дрібним зубом;
- ручним або механізованим різальним інструментом для композитів.

Обрізка виконується з мінімальною вібрацією для запобігання розшаруванню крайових зон.

2) Механічна обробка отворів та посадочних зон

У випадку наявності конструктивних отворів (кріпильних, технологічних або монтажних) їх обробка виконується після повного затвердіння матеріалу.

Рекомендовано застосовувати:

- свердління твердосплавними або алмазними свердлами;
- низькі швидкості різання з подачею без ривків;
- підкладні матеріали для запобігання виходу волокон;

- можливе використання свердління з подальшим розсвердлюванням для підвищення точності.

Особлива увага приділяється запобіганню розщепленню карбонових шарів.

3) Склейка виробу

Після перевірки якості двох половинок виготовленого виробу здійснюється процес склеювання.

- Половинки обробляються шліфуванням та очищенням;
- На поверхні, що будуть склеюватись, наноситься відповідний композитний клей;
- Половинки суміщаються та фіксуються у спеціальній тимчасовій оснастці для забезпечення рівномірного та якісного притиску;
- Контроль товщини шва та геометрії;
- Додаткова полімеризація шва для забезпечення монолітності конструкції;

Після склеювання, виріб проходить перевірку на якість, зсув деталей, наявність дефектів та відповідність геометричним параметрам.

4) Шліфування та доведення поверхні

Для забезпечення якісної зовнішньої поверхні виконується шліфування:

- ручне або механізоване шліфування абразивними матеріалами;
- вирівнювання локальних дефектів поверхні;
- усунення гострих країв і задирок.

При цьому важливо уникати перегріву поверхні, оскільки це може призвести до локального пошкодження полімерної матриці.

5) Контроль геометрії після обробки

Після механічної обробки виконується повторний контроль:

- перевірка лінійних розмірів балки;
- контроль прямолінійності та відсутності викривлень;

					КР.134.4161.05.ПЗ.04	Лист
						61
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

- перевірка товщини стінок (за необхідності);
- візуальний контроль поверхневих дефектів.

У разі виявлення локальних дефектів можуть застосовуватися ремонтні композитні матеріали (локальні накладки або заповнення смолою).

4.6. Висновки до розділу

1. Проведено аналіз сучасних технологій формування виробів із полімерних композиційних матеріалів та обґрунтовано вибір технології RTM Light як найбільш доцільної для виготовлення довгомірної будівельної конструкції.
2. Розроблено конструкцію формуютьуючої оснастки та запропоновано виготовлення балки у вигляді двох окремих половинок з подальшим їх склеюванням у єдину коробчасту конструкцію.
3. Сформовано структуру армувального пакета з використанням біаксіальної склотканини та однонапрямого вуглецевого волокна, що забезпечує раціональний розподіл навантажень у конструкції та необхідні показники міцності й жорсткості балки. Розроблено технологічний процес виготовлення, який включає підготовку оснастки, укладання армувального пакета, вакуумування, інжекцію вінілефірної смоли, полімеризацію, контроль якості та механічну обробку виробу.

ВИСНОВКИ.

Виконано розробку конструкції та технології виготовлення балки перекриття з композиційного матеріалу. Для цього

1. Проведено аналіз існуючих типів балок перекриття та встановлено, що композитні конструкції є перспективною альтернативою традиційним дерев'яним, металевим і залізобетонним балкам завдяки високому співвідношенню міцності до маси, корозійній стійкості та довговічності.
2. Обґрунтовано вибір конструкції коробчастої комбінованої балки, геометричні параметри якої прийнято за аналогом існуючої дерев'яної балки з модрина. Для армування конструкції вибрано поєднання склотканини E-glass Hexcel HiMax 600 та однонапрямого вуглецевого волокна Tooray T300, полімерна матриця – сполучник на основі вінілефірної смоли АМЕ 5000 Т-30. Така комбінація матеріалів забезпечує необхідні показники міцності, жорсткості, довговічності та економічної ефективності.
3. Виконано розрахунок зовнішніх навантажень, визначено небезпечні перерізи балки у жорстких защемленнях, де вигинаючий момент максимальний та центрі балки, де прогин є максимальним. Також отримано розрахункові значення згинальних моментів і поперечних сил, необхідні для проєктування композитної конструкції. Результати розрахунків підтвердили працездатність запропонованої схеми балки при заданих умовах експлуатації.
4. Розроблено технологічний процес виготовлення балки методом RTM Light із застосуванням вінілефірної смоли та комбінованого армування. Використання даної технології дозволяє забезпечити якісне просочення армувальних матеріалів, низьку пористість виробу, високу повторюваність геометричних параметрів і стабільні механічні характеристики готової конструкції.

					КР.134.4161.05.ПЗ.00	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		63

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДН КФКСумДУ (Тема 6. Перекриття і підлоги)
URL:https://dl.kfk.sumdu.edu.ua/mod/book/view.php?id=24214&chapterid=9259#mod_book-chapter
2. ДБН В.2.6-161:2017. Дерев'яні конструкції. Основні положення. – Київ. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2017р.
3. Державні будівельні норми України. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження та впливи. Норми проектування. НДПІ сталених конструкцій ім. В.Н. Шимановського.
URL:<https://promdesign.ua/assets/files/%20В.1.2-2-2006.pdf?srsltid=AfmBOooFwgIa2J84SXDHcZedURJzTiVOD5ZHJsPDROos2uj5b6Wb3ICA>
4. StudFiles. Балкові перекриття,
URL:<https://studfile.net/preview/13842712/page:2/>
5. Internal Project Houseboat Basis of Design.
URL:file:///C:/Users/NataM/Downloads/38833FF26BA1D.UnigramPreview_g9c9v27vpyspw!App/House%20boat%20basis_of_design.pdf
6. Fiberglass Beams: The Strong, Lightweight Solution Transforming Construction & Beyond,
URL:<https://www.chemlead-frp.com/2025/07/12/fiberglass-beams-the-strong-lightweight-solution-transforming-construction-beyond/>
7. INEOS, Technical data sheet (AME™ 5000 T-30 Premium marine resin),
URL:<https://romar-voss.nl/downloads/tds/tds-ame-5000-t-30-premium-marine-resin.pdf>
8. Composite envisions, URL:https://www.compositeenvisions.com/Hexcel-HiMax-Fiberglass-E-Glass-Fabric-Biaxial-45-45-17.7oz-600gsm?utm_source=chatgpt.com

9. T300 Carbon fiber data sheet, URL:<https://toray-cfe.com/wp-content/uploads/2025/05/Torayca-T300-Technical-Data-Sheet.pdf>
10. Vinyl ester resins, URL:<https://romar-voss.nl/en/products/speciale-harsen/vinyl-ester-resins>
11. Types of resins and their uses,
URL:<https://www.thomasnet.com/articles/plastics-rubber/types-of-resins/>
12. Union. What is vinyl ester resin used for.
URL:<https://www.unioncomposites.com/What-is-Vinyl-Ester-Resin-Used-For.html>
13. An Assessment of the Behaviour of Ceiling Beams of Different Structure,
URL:<https://www.mdpi.com/2076-3417/15/21/11543>
14. What is FRP? A complete guide to fiberglass reinforced polymer composites,
URL:<https://www.flcomposite.com/what-is-frp?utm>
15. Карпов Я.С. Проектування деталей та агрегатів із композитів: підручник / Я.С. Карпов. - Х.: Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т». - 2010. - 768 с.
16. Опір матеріалів Підручник / Г. С Писаренко О Л Квітка, Е С Уманський За ред Г С Писаренка — К: Вища школа, 2004,- 655 с
17. Карпов Я.С. Проектування і конструювання виробів з композиційних матеріалів. Теорія і практика: підручник. - Х. Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є.Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2015. - 672 с.
18. Гейко С. П. Технологія виготовлення суднових конструкцій із полімерних композиційних матеріалів/ С. П. Гейко, Є. Т. Бурдун, – Миколаїв : НУК, 2014. – 254с.
19. CompositesLab – Manufacturing Processes,
URL:<https://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes>
20. Composites Knowledge Network (CKN),
URL:<https://compositeskn.org/KPC/A215>
21. Manufacturing Technologies – Composites ATE, URL:<https://www.composites-ate.com/en/manufacturing-technologies/>