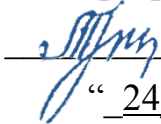


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Кораблебудівний навчально-науковий інститут
Кафедра будівельної механіки та конструкції корпусу корабля

«Допущений до захисту»

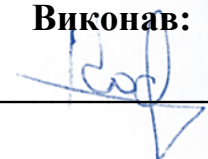
Завідувач кафедри, д.т.н., професор

 Л.І. Коростильов
“ 24 ” 06 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти бакалавра

на тему: Проектування та технологія виготовлення
підвісного мосту із композиційного матеріалу

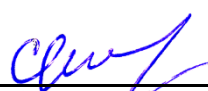
Виконав: студент групи 4161

 Дурневич К.В.

Керівник роботи:

Доцент кафедри БМ та ККК,

к.т.н., доцент

 Соломонюк Н.С.

Миколаїв - 2025

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 ракетно-космічна 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 Дурневичу Константину Викторовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Проектування та технологія виготовлення підвісного мосту із композиційного матеріалу

Керівник роботи: Соломонюк Н.С., канд.техн.наук, доцент,
(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 – пішохідний підвісний міст з довжиною 30 м, шириною 4 м, розташований у помірній кліматичній зоні.

4. Перелік питань, що належать до розробки

1) Провести аналіз літературних джерел для вивчення мостів різних конструкцій та їх особливостей та ознайомитися з існуючою нормативною базою мостів із композиційних матеріалів.

2) Розрахувати навантаження на настил мосту від пішоходів під час експлуатації та в аварійній ситуації, вибрати ванти для підвісу мосту.

3) Вибрати технологію виготовлення настилу пішохідного підвісного мосту. Підібрати матеріал, з якого виготовлятиметься міст, смола, пінопласт та обладнання.

4) Зробити збірне креслення мосту та його складових частин.

5) Зробити висновки стосовно доцільності використання композиційних матеріалів для будівництва мостів та результатів розрахунків параметрів мосту

5. Перелік презентаційних матеріалів 1 – мости різних конструкцій з сучасних матеріалів та нормативна база мостів із склопластику, 2, 3 – Розрахунки навантажень на міст від пішоходів та від впливу вітру, 4, 5 – Креслення мосту в загальному вигляді, креслення кріплень мосту, його складових частин, 6 – Характеристики матеріалу, з якого виготовлятиметься міст, 7 – Технологія виготовлення пішохідного мосту.

6. Консультанти розділів роботи

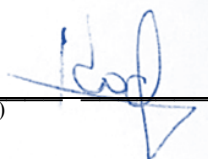
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1			
2			
3			
4			

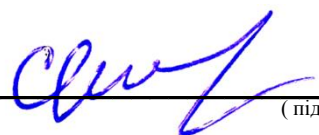
10.02.2025

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Типи мостів та матеріали, з яких вони виготовляються	02.05.25	виконано
2	Вибір та обґрунтування складу, структури композиційного матеріалу для настилу мосту.	13.05.25	виконано
3	Розрахунок конструкційних деталей пішохідного мосту з композиційного матеріалу	27.05.25	виконано
4	Технологія виготовлення секції настилу мосту	12.06.25	виконано

Студент _____ (підпис)  Дурневич К.В. (ПІБ)

Керівник роботи _____ (підпис)  Соломонюк Н.С. (ПІБ)

АНОТАЦІЯ

У роботі вдосконалено конструкцію настилу підвісного пішохідного мосту тришаровою конструкцією, несучі шари якого – склопластик, заповнювач – пінопласт. Вибрано параметри перерізу тришарової конструкції для настилу мосту з умов жорсткості та мінімуму маси. Розраховано навантаження повністю на настил мосту при аварійних ситуаціях. Перевірено міцність тришарової конструкції у вузлах з'єднання секцій мосту на зріз і зминання. Вибрано технологію виготовлення настилу мосту - метод вакуумної інжекції. Технологія вакуумної інжекції є оптимальною завдяки низьким витратам на оснащення, кращим механічним властивостям склопластику.

Ключові слова: *пішохідний підвісний міст, настил мосту, тришарова конструкція, композиційні матеріали.*

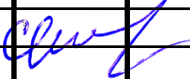
ABSTRACT

The work improves the design of the deck of a suspended pedestrian bridge with a three-layer structure, the load-bearing layers of which are fibreglass, and the filler is foam plastic. The parameters of the cross-section of the three-layer structure for the bridge deck are selected based on the conditions of rigidity and minimum weight. The load on the entire bridge deck in emergency situations has been calculated. The strength of the three-layer structure at the joints of the bridge sections was tested for shear and crushing. The technology for manufacturing the bridge deck was selected – the vacuum injection method. Vacuum injection technology is optimal due to low equipment costs and the superior mechanical properties of fibreglass.

Keywords: *pedestrian suspension bridge, bridge deck, three-layer structure, composite materials*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 ТИПИ МОСТІВ ТА МАТЕРІАЛИ, З ЯКИХ ВОНИ ВИГОТОВЛЯЮТЬСЯ	8
1.1 Загальні відомості про споруду	9
1.2 Конструкція та призначення мостів.....	11
1.3 Мости з композитних матеріалів	17
1.4 Нормативна база.....	20
1.5 Постановка задачі.....	29
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКИ НАВАНТАЖЕНЬ НА МІСТ.....	30
2.1. Вимоги до експлуатаційних властивостей матеріалу.....	31
2.2. Розрахункова схема мосту.....	31
2.3. Визначення характеристик жорсткості мосту та його елементів.	32
2.4. Параметри жорсткості пластин мосту.....	36
2.5. Деформації та напруги в палубі, днищі та стінках при загальному згинанні.....	37
2.6. Заповнювач для тришарової конструкції.....	39
2.7. Додаткові матеріали, що використовуються в технології формування виробу.....	40
2.8 Висновки за розділом	44

					КР.134.4161.01.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Студент		Дурневич К.В.			Зміст		Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник		Соломонюк Н.С.						5	68
							НУК		
Н. контр.		Захарова І.О.							
Зав. каф.		Коростильов ЛІ							

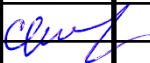
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ	
ПІШОХІДНОГО МОСТУ З ПКМ.....	46
3.1. Пружні характеристики та характеристики міцності для склопластикових деталей мосту.....	46
3.2. Вибір поперечного перерізу секції	47
3.3. Формули розрахунку висячих мостів без урахування прогину.....	51
3.4 З'єднання секцій.....	53
3.5. Висновки за розділом	54
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ТА ВИРОБУ З НЬОГО	55
4.1 Можливі технології виготовлення конструкції.....	56
4.2. Вибір метода виготовлення конструкції	60
4.3. Послідовність виготовлення конструкції.....	61
4.4 Висновки за розділом.....	64
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	66

ВСТУП

Міст поєднує дві частини суші, що розділяє вода, рів або інша перепона. Найчастіше вони виготовляються з залізобетону та сталі. Сталь добре працює на розтягування та стискання, але для сталевих споруд потрібно передбачати антикорозійний захист. У бетонних конструкціях висока міцність на стискання, але він не сприймає розтягуючі зусилля, тобто не забезпечує надійної роботи конструкції. Залізобетонні мости в експлуатації дешевші за металеві, але дуже важкі і мають низьку корозійну стійкість (через металеву арматуру), що призводить до зниження несучої здатності споруди.

Використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) надає можливості для зниження маси конструкцій, збільшення строку служби, підвищення надійності під час експлуатації та значне зниження експлуатаційних витрат, сприяє удосконаленню технічних процесів та скороченню їх трудомісткості, і, як наслідок, підвищенню продуктивності праці.

					КР.134.4161.01.ПЗ.00	Лист
						7
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

					КР.134.4161.01.ПЗ.01								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1 Типи мостів та матеріали, з яких вони виготовляються				Літ.	Арк.	Аркушів		
Студент		Дурневич К.В.									8	68	
Керівник		Соломонюк Н.С.							НУК				
Н. КОНТР.		Захарова І.О.											
Зав. каф.		Коростильов Л.І											

РОЗДІЛ 1 ТИПИ МОСТІВ ТА МАТЕРІАЛИ, З ЯКИХ ВОНИ ВИГОТОВЛЯЮТЬСЯ

1.1 Загальні відомості про споруду.

Мости через водні перешкоди люди будували з найдавніших часів з дерева, природних кам'яних валунів і навіть з ліан (підвісні мости індіанців Південної Америки). Деякими з них люди користуються дотепер (античні мости Фабриція 62 до н. е., Мульвія 109 до н. е., Святого Ангела 136 — усі в м. Римі, Італія).

З кінця 18 ст. у мостобудуванні почали застосовувати залізо — спершу чавун в аркових мостах, а згодом сталь у мостах різних конструктивних систем. Від середини 19 ст. набули поширення підвісні й вантові мости. З початку 20 ст. розвинуто спорудження залізобетонних мостів, які в разі застосування в їхніх тримальних конструкціях попередньо напруженої арматури дозволяють перекривати значні прогони без проміжних опор. Протягом 20 ст. прогони мостів значно збільшилися, сягнувши 1280–1991 м. Найбільші з таких мостів стали світовими зразками інженерного мистецтва (міст «Золоті ворота» у м. Сан-Франциско). Відомими за своїми високими мистецькими якостями стали збудовані на різних континентах мости архітектора С. Калатрави (міст Конституції 2008 у м. Венеції) [1].

Серед великої кількості сучасних матеріалів для мостів поширюються ПКМ, серед яких найбільший розвиток отримали склопластики. В порівнянні із вугле- та органопластиками, вони краще працюють на стискання, розтягування, мають високу ударну в'язкість, та відносно низьку ціну. Низьку жорсткість склопластику можна компенсувати виготовленням з них тришарових конструкцій [2].

Мости із синтетичних матеріалів більш легкі, отже, збільшується частка корисного навантаження, що вони можуть нести. Хоча такі споруди по більшій частині сконцентровані в трьох великих географічних областях, напрямок, що формується в Сполучених Штатах Америки, міг би бути

					КР.134.4161.01.ПЗ.01	Лист
						9
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

початком більш широкого застосування. За статистичними даними, на літо 2003 року, 337 (175 автотранспортних і 162 пішохідних) установлених мостів зареєстровані тільки в трьох географічних областях - Західній Європі, Північній Америці і частині Далекосхідної Азії. Такі найбільші області світу, як Східна Європа, Середній Схід, Центральна і Південна Америки в статистиці майже відсутні.



Рис. 1.1 - Вантовий пішохідний міст у Франції, побудований у 2002 г.

В Азії, тільки дві країни зайняті цією проблемою – Японія та Китай, єдина заявка на Австралію, а в Європі, тільки 10 країн. З них, лише чотири (Німеччина, Нідерланди, Швейцарія і Великобританія), мають як автодорожні так і пішохідні мостами з композиційних матеріалів. Явне лідерство у Північній Америці, переважно в Сполучених Штатах - 135 автотранспортних мостів і 121 пішохідний міст (табл.1.1).

Таблиця 1.1 - Географічне розподілення установлених мостів.

Географічна область	Пішохідні мости	Автодорожні мости
Північна Америка	123	148
Європа	20	14
Далекосхідна Азія	19	13
Усього	162	175

Переваги палуб мостів, що виготовлені із полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) :

					КР.134.4161.01.ПЗ.01	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		10

- довговічність (висока корозійна стійкість та опір стомленню);
- низька вага;
- висока питома міцність;
- швидке установлення;
- висока якість виробничих процесів;
- високі експлуатаційні показники при малих витратах на обслуговування і ремонт;
- зручність транспортування і монтажу.

1.2 Конструкції та призначення мостів

За призначенням мости бувають залізничні, автомобільні, метромости, пішохідні, комбіновані (наприклад: автомобільно-залізничний), водяні шляхопроводи(мости для кораблів). Розрізняють також трубопровідні мости, акведуки – використовуються для транспортування води та віадуки – мости через яри або ущелини, з'єднують точки рівні за висотою [3].

За конструкцією мости поділяються на балкові, розпірні та комбіновані.

Балкові - найпростіший вид мостів (рис. 1.2). Призначені для перекриття невеликих прольотів. Пролітні будови - балки, що перекривають відстань між опорами. Основна відмінна риса балкової системи полягає в тому, що з пролітних будов на опори передаються тільки вертикальні навантаження, а горизонтальні відсутні.

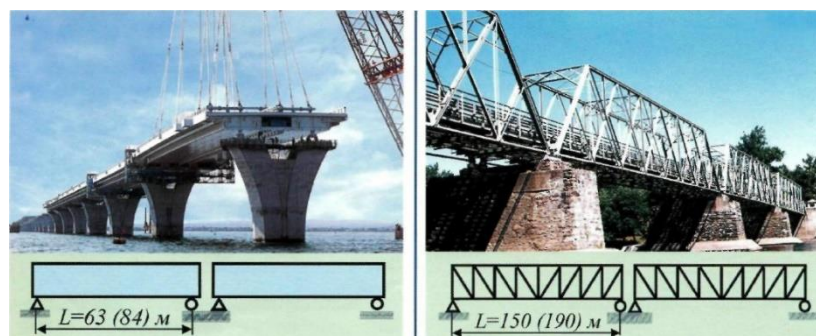


Рис. 1.2 - Балковий міст Британія – Уельс [11]

Балкові мости поділяються на такі типи:

- 3 розрізною системою - складається з ряду балок, причому одна балка перекриває один проліт. Система статично визначена і може застосовуватися за будь-яких типів ґрунтів. Недоліки: велика кількість деформаційних швів і обов'язкова наявність двох опорних частин на кожній проміжній опорі (рис. 1.3).

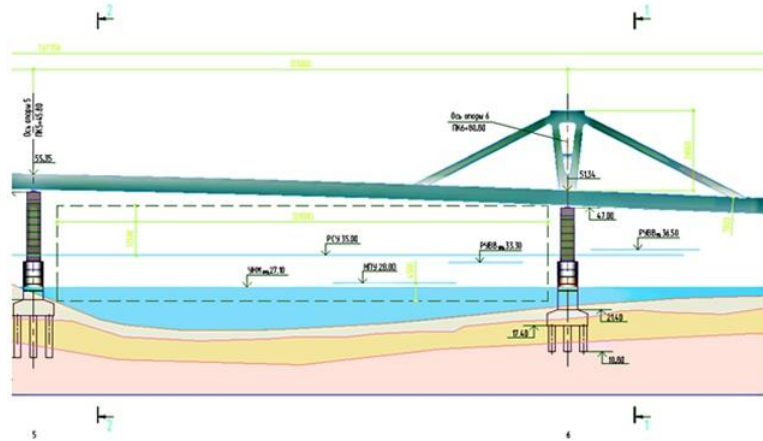


Рис. 1.3 - Розрізна система мостів [9]

Нерозрізна система - одна балка прогонової будови перекриває кілька прольотів або одразу все. Таким чином, прогонова будова нерозрізної системи розраховується як багато опірна статично невизначена балка з використанням методу сил, методу переміщень або інших методів розрахунку статично невизначених систем, застосовуваних у будівельній механіці. Нерозрізна система краще меншим, ніж у розрізній, кількістю деформаційних швів і меншою будівельною висотою. Недолік такої системи - чутливість до ґрунтів (рис 1.4).

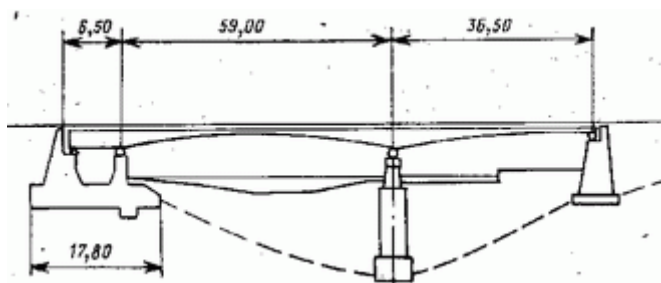


Рис. 1.4 - Нерозрізні системи мостів [3]

Консольна система складається з двох типів балок. Одні балки спираються на дві опори і мають консольні звиси. Інші балки називаються

підвісними, оскільки опираються на сусідні балки. З'єднання балок здійснюється за допомогою шарнірів (рис.1.5). Перевагою консольної системи є її статично визначеність, а отже, легкість розрахунку і нечутливість до ґрунтів. До недоліків системи можна віднести велику кількість і складність пристрою деформаційних швів шарнірного типу, а також порушення комфортності проїзду в зоні шарнірів. В даний час мости такої системи споруджуються рідко (рис.1.5).

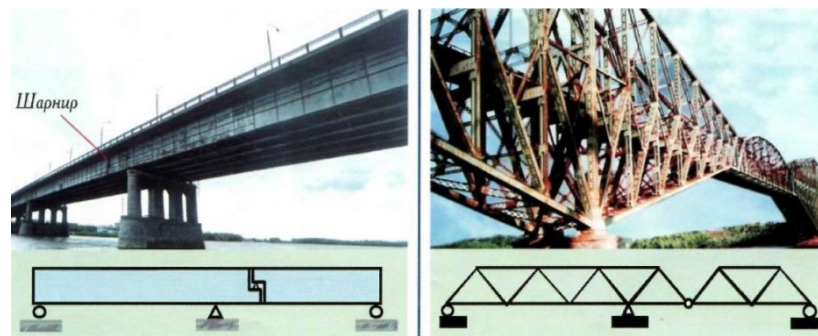


Рис. 1.5 - Консольна система мостів [11]

Температурно-нерозрізна система складається з двохопорних балок, об'єднаних в ланцюг за допомогою верхньої сполучної плити. Під дією вертикальних навантажень така система працює як розрізна, а під дією горизонтальної - як нерозрізна. Її перевагою є менша кількість деформаційних швів, а недоліком - обов'язкова наявність двох опорних частин на кожній проміжній опорі.

Розпірні системи відрізняються від балкових тим, що, навантаження, які передаються з пролітних будов на опори, мають не тільки вертикальну, а й горизонтальну складову, яку називають в будівельній механіці розпором. Виділяють кілька різновидів розпірних систем, які досить сильно відрізняються один від одного:

Рамна система складається з рам, стійки яких виконують роль опор, а ригелі - роль пролітних будов (рис. 1.6). За формою рами можуть бути Т-подібними, П-подібними, а також мати дві похилі стійки та консольні звиси (спеціальної назви не мають). Перевагами рамної системи є невелика будівельна висота і збільшений в порівнянні з балковими системами підмостовий простір. Все це робить рамні конструкції зручними для

шляхопроводів і естакад. Також дана система може бути застосована в гірських умовах через те, що там в силу особливостей рельєфу не можна знизити рівень проїзду. Недоліками рамної системи є складність будівництва і чутливість до ґрунтів. Такі системи в даний час мало є застосованими через дорожнечу і специфічність.

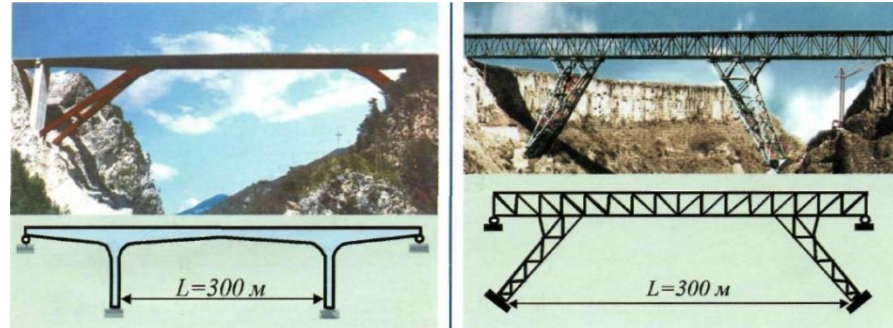


Рис. 1.6 - Рамна система мостів [11]

Висячі системи - мости, в яких основна несуча конструкція виконана з гнучких елементів (канатів, ланцюгів і ін), що працюють на розтяг, а проїжджа частина підвішена. Цей вигляд представляють всі найбільші по довжині і висоті прольоту мости світу. Мости такого типу виглядають дуже гармонійно (рис.1.7)

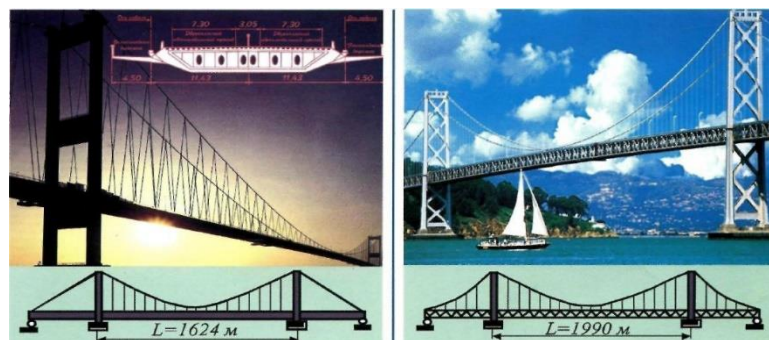


Рис. 1.7 - Схема висячих мостів [11]

Вантові мости - різновид висячих мостів: роль основної несучої конструкції виконує вантова ферма, виконана з прямолінійних сталевих канатів. Ванти прикріплені до пілонів - високим стійкам, що встановлюється безпосередньо на опорах. Пілони в основному розташовуються вертикально, але не виключено і похиле їх розташування. До вант кріпиться балка жорсткості, на якій розташовується мостове полотно. Ванти розташовуються

					КР.134.4161.01.ПЗ.01	Лист
						14
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

під кутом нахилу до горизонталі не менше 30° , тому що в протилежному випадку в них виникають великі зусилля, і жорсткість сильно зменшується. Балки жорсткості краще виконувати коробчастого перетину, оскільки це поліпшує її роботу на кручення від тимчасових навантажень і від дії вітру. Найбільш часто вантова система застосовується при перекритті глибоких рік і в міських умовах. Прикладом такого типу моста є міст Ріо-Антіріо, що в Греції (рис 1.8).

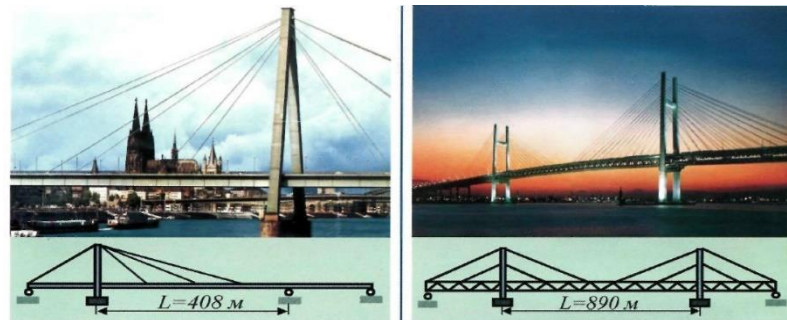


Рис. 1.8 – Ріо- Антіріо (Греція)— вантовий міст с чотирма пілонами.[4]

У арочних мостах основними несучими конструкціями є арки або звід. Арка - криволінійний брус, у якого поперечний розмір менше висоти. Звід - криволінійний брус, у якого ширина перерізу значно більше висоти. Аркові мости можуть бути з їздою поверху, понизу та посередині. Опори арочних мостів завжди масивні, оскільки повинні бути розраховані і на сприйняття розпору. При великих прольотах арки є більш економічними за балкові конструкції, але тільки стосовно прогонових будов. Через велике розвинення опор у поперечному перерізі міст аркової системи дешевше балкової тільки при висоті опор до 2 м. Аркові мости характерні для гірських умов, оскільки дозволяють перекрити більший проліт, ніж балки, а в умовах гірського рельєфу спорудження додаткових опор не виправдано. Також специфічна область застосування арочних мостів обумовлена тим, що вони вимагають великого підмостового простору, особливо з їздою поверху, що призводить до подорожчання й ускладнення будівництва насипів підходів, які можуть досягати висоти 20 м; зростає ймовірність зсувів на таких насипах у

початковий період їх експлуатації. Часто ародні мости будують в міських умовах з міркувань краси. (рис.1.9)

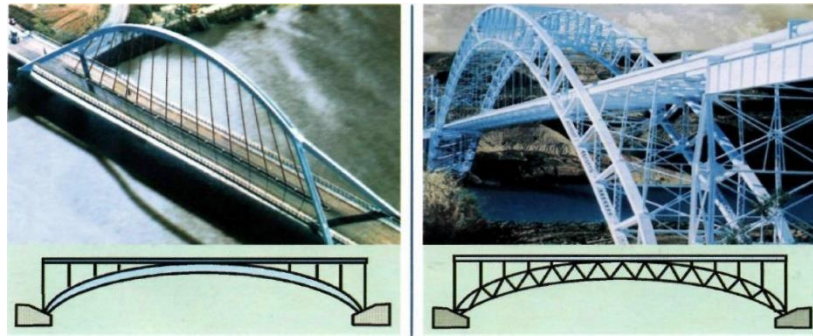


Рис. 1.9 - Схема ародного мосту [11]

Понтонні, або наплавні - тимчасові мости на плавучих опорах. Основне застосування понтонних мостів - організація тимчасових переправ через водні перешкоди при аварії або під час ремонту постійних мостів, у військовій справі, при ліквідації наслідків стихійних лих та інших.

Варто відзначити окремо горбаті мости, які відрізняються своєю формою: вони істотно вигнуті вгору.

Також розрізняють мости з їздою поверху, понизу та посередині.

Особливий тип мостів - розвідні мости. У розведеному стані міст не заважає проходу суден.

Особливі конструкції розвідних мостів:

1. мости, розводяться підняттям середньої частини:
 - перший тип: проліт піднімається в горизонтальному положенні вгору (наприклад залізничний міст у Ростові-на-Дону);
 - другий тип: проліт або прольоти піднімаються, повертаючись навколо одного з шарнірів;
2. поворотні мости: у таких мостів середня частина шарнірно укріплена на що стоїть на середині річки опора. Міст розводиться поворотом середньої частини на 90° , таким чином середня частина стає паралельна руслу річки.

Прикладом такої конструкції служить Варварівський міст в місті Миколаєві, поворотний проліт якого має довжину 134 м, і міст у Валенсії, за яким прокладена траса для перегонів Формули-1. [2]

1.3 Мости з композитних матеріалів

Заміна бетону і сталі, що використовувались на старіючих мостах, стає необхідністю. Схильність до корозії, вік і недостатнє технічне обслуговування приводять до погіршення, а в деяких випадках, до руйнування мостів. Стихійні лиха (урагани, повені, землетруси) погіршують ситуацію. Близько півмільйона мостів у США (75%) піддається частковому або повному руйнуванню щороку. Ремонт оцінили у \$90 мільярдів, не включаючи будівництво нових мостів.

Перший композитний настил мосту (рис.1.10) був встановлений в місті Утрехт в Нідерландах, він замінив дерев'яний міст, який використовувався для пішоходів і аварійних машин.



Рис. 1.10. – міст Утрехт в Нідерландах.

Проект задуманий, як пілотний для подальшої заміни мостових проектів в Нідерландах, де багато дерев'яних мостів 70-років, які повинні бути замінені протягом найближчих декількох років. Подальший потенціал такого композиційного настилу мосту спостерігається в аналогічних ринках, таких як Бельгія та Німеччина, а також США і Японії.

Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата

КР.134.4161.01.ПЗ.01

Лист

17

Міст довжиною 12 м і шириною 5м з загальною вагою 7 тонн і максимальним навантаженням 45 тонн. Крім того, поручні можуть мати горизонтальне навантаження 3 кН на метр огорожі. Інженерні роботи були виконані Лайтвет Стракчерс БВ, які вибрали конструкційну бальзу Балтек як заповнювач, зі скляними мультиаксіальним армуванням і поліефірну смолу.

Основні вимоги до розробки композитного варіанту, щоб проектна висота мосту повинна бути якомога мала і мала достатньо невелику опуклість мосту, це для того щоб не обмежувати доступ для інвалідних колясок та велосипедистів. Обидві цілі були досягнуті в обраній конструкції.

Всі частини вироблені вакуумною інфузією Лайтвейт Стракчерс БВ у Делфті. Потім вони були відправлені в Міркірк, де міст був зібраний, нанесене покриття і були встановленні поручні, перед остаточною установкою в Утрехті. Встановлення мосту зайняла всього кілька годин і інші дорожні роботи зайняли близько 3 днів. Це останні з декількох композитних мостів з заповнювачем Балтек, що спроектовані і побудовані Лайтвет Стракчерс БВ [5].

Компанія Martin Marietta привернула всесвітню увагу застосуванням ПКМ для виготовлення настилу мосту. У порівнянні з настилами з традиційних матеріалів, ці настили з ПКМ мають наступні переваги:

- низька вага (1\5 ваги порівнюваної бетонної палуби).
- стійкість до корозії,
- легке транспортування,
- швидке встановлення.

Висока міцність і низька вага дозволяє настилу мостах, витримувати сучасні навантаження руху.

Настил мосту з ПКМ також забезпечує більшу довговічність і менші експлуатаційні витрати по догляду за мостом. Ці й інші переваги позиціонують армовані волокнами композиційні матеріали як важливий будівельний матеріал.

Перший в Європі міст із пластику, армованого скловолокном, зведений на автобані в Німеччині біля Франкфурта. Застосування композиційних

					КР.134.4161.01.ПЗ.01	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		18

матеріалів і полегшена конструкція дозволили змонтувати міст біля автотраси і перемістити вже готову конструкцію повністю, без істотних перешкод для руху автотранспорту. Плита проїзної частини полімерного мосту зроблена з армованого скловолокном полімеру (FRP), склеєного на двох сталевих підставах. Міст завдовжки 27 м і шириною 5 метрів важить 80 тонн і може використовуватися, як звичайний традиційний міст. Він має таку ж форму, як і звичайний - бетонний. Мабуть, єдиною відмінністю є те, що несучі сталеві конструкції мосту пофарбовані в червоний колір і мають опуклу форму. Проїзна частина, самий важкий елемент мосту, порожня. Ту функцію, яку виконують балки в дерев'яному мосту, тут виконують порожнисті трикутні балки з пластмаси, зчеплені один з одним певним чином. Крім малої ваги ця конструкція має й інші переваги. Армована волокнами пластмаса відіграє важливу роль у будівництві мосту. У той час як звичайні мости із залізобетону вимагають тривалого часу на будівництво, цей виготовляється цілком і потім транспортується до будівельного майданчика. Повна установка займає менше одного дня. Композитне волокно має велику несучу здатність. Крім того, воно водостійке на відміну від інших матеріалів, використовуваних при будівництві мосту. Мости з композитного волокна не потребують фарбування, не псуються від впливу води і солі. При цьому варто звернути увагу на те, що обходиться ремонт мосту в два рази менше, ніж його будівництво. Половина вартості такого моста окупається за 40 років користування, тоді як за цей час бетонний міст повинен бути вже два рази відремонтований. Якщо до цього додати вартість подоланих пробок, то міст із композитного волокна окупається ще раніше. Важливо і те, що композиційні конструкції можна зробити будь-якої довжини і форми, що відкриває нові горизонти в будівництві мостів.

Пішохідний міст на Зміїному Пагорбі. Міст довжиною 33 м і шириною 3 м складається з трьох ділянок, середній з яких знімний, для проходження дуже високих об'єктів по основній дорозі руху. Тришарова конструкція, що складається з панелей ПКМ і заповнювача, застосовувалася як для палуби моста, так і для колон. Таким чином, для мосту необхідно раціонально

					КР.134.4161.01.ПЗ.01	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		19

спроєктувати його конструкцію і підібрати такий матеріал, щоб уникнути таких проблем, як велика вага споруди, низька корозійна стійкість, низька жорсткість. Майже повністю дані проблеми можна вирішити використанням для виробництва мосту тришарової конструкції.

Унікальна конструкція настилів Вагнерс привернула увагу представників графства Ері, в штаті Нью-Йорк, США. Інтерес був, перш за все, виявлений до корозійностійким деталей, оскільки місцеві сніжні зими надають руйнівну дію на традиційні конструкції мостів, при цьому для боротьби зі снігом витрачається до 96000 тонн солі на автомагістралі в 1200 миль. Представниками графства Ері було розміщено замовлення у Вагнерс на проектування нового мосту на заміну старого. Готовий міст (рис.1.12) був встановлений всього за один тиждень, а в 2005 році компанія Вагнерс отримала від нью-йоркського відділення Департаменту по будівництву споруд громадського призначення в США почесну нагороду "Найкращий проект 2005 року".



Рис. 1.12 - Міст в США, штату Нью – Йорк.

1.4 Нормативна база

Нажаль в Україні немає достатньої нормативної бази для проектування мостів із композиційних матеріалів. В Україні складна ситуація із мостобудуванням. Більшість мостових переходів та шляхопроводів потребує

капремонту. На сьогодні основним джерелом фінансування будівництва мостів являється державне фінансування. Можливі і інші джерела фінансування, але це дуже малий відсоток. Були дослідженні нормативні документи, які були розроблені в США. Одним із таких документів являється Спеціальний путівник для розрахунку АВП пішохідних мостів Американської державної асоціації дорожнього і транспортного руху, 2008 рік [5].

– *Навантаження від пішоходів*

Головні балки: головні балки, в тому числі балки, ферми і арки повинні бути розраховані для навантаження від пішоходів 4.07 КПа по настилу мосту. Живе навантаження повинне прикладатися на цю площу настилу, так щоб вони створювали максимальні навантаження у зв'язках, що будуть проектуватися. Якщо пішохідний настил, на який прикладаються ці навантаження(простір, що впливає на навантаження) більше 37.16 м, навантаження від пішоходів може бути меншим та розраховується за наступним рівнянням

$$w = 85(0.25 + (15/\sqrt{Al}))$$

w- розрахункове навантаження від пішоходів, Al- вплив площі настилу

В жодному випадку навантаження від пішоходів не повинні прийматися менше ніж 3.11 кПа.

Перехресні балки: настил мосту і підтримуюча його конструкція, включаючи другорядні стрингера, балки та їх з'єднання головних підтримуючих елементів, мають бути спроектовані для навантажень 4.07 КПа без редукування.

– *Вітрові навантаження*

Для елементів прольоту застосовується вітрові навантаження передбачені AASHTO, за виключенням мінімального погонного навантаження

Вітрові навантаження наступної інтенсивності повинні бути прикладені горизонтально під правильним кутом до повздовжньої осі конструкції. Вітрові навантаження мають бути прикладені до вертикальної

					КР.134.4161.01.ПЗ.01	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		21

проекції площі всіх елементів прольоту включаючи зв'язки перекриття з навітряного боку:

- для ферм та арок - 3.59 КПа
- для балок та бімсів - 2.39 КПа

Для відкритих фермових мостів, коли вітер може вільно проходити крізь ферму, міст може бути спроектований для мінімального горизонтального навантаження 1.68 КПа підвищену вертикальну проекцію мосту, як ніби вона була закрита. Вказане навантаження відповідає базовій швидкості вітру в 67 м/с та може змінюватись залежно від місцевих умов.

Вітрова перекидна сила повинна застосовуватися згідно статті 3.15.3 Standard of Specifications Highway Bridges.

– *Комбінації навантажень*

Комбінації навантажень, тобто допустимий відсоток напруження для робочого навантаження і коефіцієнт навантажень, встановлюються, як вказано в таблиці 3.22.1A Standard of Specifications Highway Bridges, і мають бути використанні в наступній модифікації:

- Швидкість вітру для живого навантаження WL дорівнює нулю.
- Повздовжня сила LF приймається рівною нулю

– *Особливості проектування*

Вібрації

Власна частота пішохідного мосту (у вертикальному напрямку) без перемінного навантаження має бути більше 5 Гц для попередження проблем зв'язаних з першою та другою гармоніками. Якщо розглядається друга гармоніка то виконується динамічний комп'ютерний аналіз.

Власна частота пішохідного мосту в горизонтальному напрямку без перемінних навантажень має бути більше 3 Гц для уникнення проблем через поперечний рух, що спричиняє першу та другу гармоніку.

Власна частота пішохідного мосту в вертикальному та горизонтальному напрямках повинна бути різною для попередження проблем, які пов'язані з комбінацією впливів від першої та другої гармоніки в цих напрямках.

Пішохідні мости, можуть викликати вібрації, які викликані людьми, що ходять і бігають по ним [6]. Потенціал динамічної дії ходьби чи бігу був вивчений в декількох аналізах мостів і призначений для розрахунку інших проектів, таких, як міст Онтаріо. Дослідження цього явища привело до висновку, що додатково до жорсткості, демпфування і маси, мають розглядатися динамічні реакції пішохідного мосту. Діапазон першої та другої гармоніки - це коли ходять та бігають люди в поперек пішохідного мосту 2-8 Гц при власній частоті 1,6 – 2,4 Гц. Таким чином, мостів з власною частотою нижче 3 Гц (в вертикальному напрямку) потрібно уникнути.

Для пішохідних мостів з низькою жорсткістю, демпфуванням і масою, мости з невеликою глибиною, легкі (такі мости, як зі склопластики) і т.д. і на площині мосту, де очікується, що будуть бігати, стрибати, розрахунки мають показати мінімальну власну частоту 5 Гц (у вертикальному напрямку) уникаючи другу гармоніку. Якщо конструкційно частота не може бути економічно зміщена, для зменшення проблем вібрації можуть бути ефективно використані жорсткі поручні, поглиначі вібрації або демпфери.

В останні роки було декілька випадків на пішохідних мостах (класичним прикладом є Тисячолітній міст в Лондоні), де було встановлено екстремальну вібрацію в горизонтальному напрямку через ходьбу і/або біг. Ця проблема спричинена великим габаритним співвідношенням (довжина/ширина) мостів, що призвело до низької жорсткості арматури в горизонтальному напрямку. Тому що композитні мости легкі по суті, потрібно уникати власної частоти 3 Гц (в горизонтальному напрямку). Співвідношення габаритів більшого ніж 20, також слід уникати.

Коли пішохідний міст очікує частоту в діапазоні можливих частот резонансу (в горизонтальному чи вертикальному напрямку) з людьми, що ходять і/ або бігають, рівні прискорення пов'язані з обмеженням динамічних напруг і прогинів. Характеристики загасання пішохідних мостів з використанням звичайних матеріалів (залізо, дерево, бетон і алюміній), низькі і знаходяться в досить вузькому діапазоні з 1 % загасанням для представників більшості пішохідних мостів з використанням цих матеріалів.

					КР.134.4161.01.ПЗ.01	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		23

Для композитних мостів 1 % загасання – вважається досить консервативним. В основному, через болтову природу зав'язків, які використовуються в композитних структурах, від 2% до 5% демпфування вважається більш характерним діапазоном для розрахунку. Вважається, що вертикальна і горизонтальна фундаментальна частота мають відрізнятися по величині, щоб мінімізувати посилення напруг при їх взаємному комбінуванні. Наразі цей тип поведінки, може відбуватися для рівно навантаженого стану.

Конструктивні обмеження даються в Правилах проектування, що базується на праці [7]. Додаткова інформація знаходиться в виданні [8].

– *Допустимі втомні напруження.*

Розрахунки на втому не виконуються для склопластикових армованих композицій, тому що великі навантаження для них не є частими і склопластиковий композиційний міст в загальному випадку розглядається по критеріям деформації. Вітрові навантаження також виконуються по критеріям переміщення.

Питання втоми, які мають вирішальне значення в сталевій конструкції, не застосовують до армованих волокном композитних мостів. Це через низький модуль пружності, в результаті чого конструкція мосту, що задовольняє експлуатаційні вимоги, працює при низьких рівнях напруження.

– *Комбінації навантажень*

Перераховані в цьому документі навантаження мають бути розглянуті дії наступних комбінацій, в залежності від того, яка справляє найбільш несприятливий ефект на конструкцію мосту або його важливих структурних складових. (ПН - постійне навантаження; ЖН – живе (перемінне) навантаження; ВН – вітрове навантаження)

- ПН+ЖН
- ПН+ВН
- ПН+ЖН+ВН

Примітка: допустиме напруження може бути збільшене на одну третину(1/3), тільки тоді, коли вітрові навантаження діятимуть самотійно або у поєднанні з постійним та змінним навантаженням.

Інженер повинен нести відповідальність за визначення додаткових навантажень (тобто тиску землі, потоку сили, вітрових навантажень прикладених перпендикулярно до повздовжньої осі мосту і т.д.) та комбінації навантажень, необхідних для розрахунку опор.

– *Прогин.*

- Окремі балки повинні бути спроектовані таким чином, щоб навантаження від пішоходів не перевищували $1/400$ довжини прогону.

- Прогин консольної балки повинен бути обмежений навантаженнями від пішоходів і не повинен перевищувати $1/200$ консольної балки.

- Горизонтальний прогин від бокових вітрових навантажень не повинен перевищувати $1/400$ довжини прогону.

Вказані прогини від значень є більш ліберальними, ніж значення AASHTO для автодорожнього мосту, бо на відмінну від навантаження транспорту, фактичне навантаження, необхідне для досягнення максимального прогину, буде зустрічатись рідко. Пішохідні навантаження також нарастають поступово, на відміну від навантаження від транспорту. Значення $1/1000$ за вимогами правил AASHTO стосується прогинів автодорожнього руху на мосту, які нестимуть ще і пішохідні навантаження. У стандарті AASHTO Guide Specification (сталь, бетон, дерево і алюміній) прогини для навантажень від руху пішоходів не повинне перевищувати $1/500$ довжини прольоту. Прогини консольної балки через навантаження пішоходів обмежується $1/300$ цієї балки. Горизонтальне відхилення через бічний вітер не повинне перевищувати $1/500$ довжини прольоту. Для композитних мостів вказані значення є більш ліберальними у зв'язку з високою міцністю але низькою жорсткістю (модуль пружності) матеріалу. Через низькі модулі композитні мости мають, як правило мають низький рівень напруги (в порівнянні з вказаними вище матеріалами) за вказаними вище межами прогинами. Допускаючи прогин, спричинений пішохідним робочим навантаженням, що не має перевищувати $1/400$ довжини прольоту, а прогин консольної балки $1/200$ довжини консольної балки і горизонтальний прогин від дії бічного вітру, що не перевищує $1/400$ довжини прольоту, армовані

волоконном композитні мости мають більш раціональні рівні напруження в зв'язку з експлуатаційною надійністю. Це дозволяє краще використати матеріал з високим коефіцієнтом безпеки.

– *Мінімальна товщина АВП (армовані волокном полімери).*

Мінімальна товщина для замкнених конструктивних трубчастих деталей - 6.2 мм мінімізує потенціал блюмінгу (проступання волокон через руйнування поверхневого шару сполучника) і ультрафіолетової деградації матеріалу.

9.6 мм – значення товщини для відкритих елементів конструкцій і пластин. Це також зводить до мінімуму локальну втрату стійкості, яка може виникнути в фланцях і стінках профілю балок. Це також допомагає в забезпеченні додаткової міцності в напрямку з цих балок, у якому міцність в цьому напрямку залежить від сполучника.

– *З'єднання*

Згідно технічних умов, для з'єднання всіх головних і другорядних балок повинні бути використанні болтові елементи. Використовують тільки болти з оцинкованої або неіржавіючої сталі, в залежності від вибору інженера. Адгезійні з'єднання для головних й другорядних конструкційних елементів можуть бути застосовані тільки в комбінації з болтовими. Не силові елементи можуть бути з'єднані болтовим/гвинтовим способом, або склеєні. Несилові зв'язки включають проміжні перила, ватервейси, рейки і т.д.

Болтові з'єднання були широко тестовані і перевірені для композитних конструкцій. Адгезивні з'єднання застосовувати самостійно не рекомендується (але можливо) через відсутність достатніх випробувань, проведених в цій області.

Болтові з'єднання повинні бути зі сталі A307 гарячого цинкування, якщо не вимагається іншого. Монтажні пристрої повинні теж встановлюватися із оцинкованої або нержавіючої сталі.

– *Критерій напружень, що допускаються*

Критерій напружень, що допускаються використовується для проектування всіх конструктивних елементів. Фактор безпеки, що застосовується в Е.Т.Тектонік в проектуванні мостів наступні (базуються на руйнуючих напруженнях армованого волокном пластику): розтягування, стискання, згинання, зсув, зминання – 2,5; з'єднання – 3,0.

– *Снігове навантаження*

Тривале снігове навантаження повинне бути оцінене для оцінки залежних від часу ефектів (повзучості та релаксації) і очікуваного відновлення властивостей.

– *Матеріали.*

Армовані волокном полімерні композиційні матеріали

АВП мости повинні бути розроблені із високоміцного Е-скла та ізофталевої полімерної смоли, якщо не визначено іншого. Захист від погодних умов і ультрафіолетового світла повинні бути забезпечені шляхом додаванням вуалей до ламінованої конструкції. Мінімальна міцність і властивості матеріалу наступні:

Розтягування	225 МПа
Стискання	225 МПа
Згинання	225 МПа
Модуль пружності	20ГПа
Зрушення	31МПа

Мінімальна товщина композитних балок повинна бути наступною, якщо не буде запропоновано іншого:

- площа трубчастих елементів (закритого типу) повинна бути 6,35мм,
- мінімальна товщина балок з широким фланцем, канальних профілів, кутників (відкритого типу перетини), повинні бути також не тонше 6,35мм,
- Стандартна пластина повинна бути товщиною 6,35мм.

– *Настил.*

Дерев'яний настил - №2 південна жовта сосна відповідно до Американського деревного зберігаючого бюро. Для пішохідного і

велосипедного типу умов навантаження передбачений дошки 50×250мм. Для вершників і легких екіпажів передбачено дошки 75×300мм. Дошки із високо міцного Е-скла та ізофталевої полімерної смоли чи дошки із переробленого пластику можна вибрати за вимогою.

– *Дозвільні документи*

Креслення

Схематичні креслення і діаграми повинні бути представленні заказнику після отримання замовлення. В міру необхідності всі креслення потрібно підписати ліцензованим професійним інженером.

– *Виробництво*

Допуски

Всі роботи по різанню та свердлінню належить виконувати кваліфікованими робітниками з використанням інструменту з карбідовим або алмазним наконечником з допуском 1,5 мм. Не приймається використання матеріалів, що виходять за межі галузевих стандартів. Всі зрізи повинні бути очищені та герметизовані.

Перила

Перила для пішоходів та вершників повинні бути мінімум на 1м вище настилу і для велосипедного використання має бути мінімум 1,37 м вище настилу мосту.

Проміжна решітка

Всередині ферми перил додатково повинні бути розташовані безперервні горизонтальні серединні перила. Максимальний зазор між ними повинен бути за вимогами заказчика, але не перевищувати 0,23м. Якщо потрібні вертикальні штахети, то їх можна встановити за запитом.

Бордюри (за вимогою)

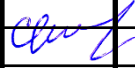
Паркові та стіжкові мости мають бордюри мають бути висотою. Промислові робочі містки використовують стандарт 100 мм жовтих профілів, якщо не вказано інакше.

Зовнішні покриття

Колір мосту повинен обиратися заказником, він може бути зеленим, сірим, бежевим і безпечним жовтим – стандартним. Покриття не обов'язкове, якщо колір надається виробу під час виготовлення. Зелений рекомендується використовувати для парків і для мостів, що випробуються. Сірий, бежевий і безпечний жовтий використовується для промислових робочих мостиків. За бажанням замовника можуть застосовуватись інші кольори [13].

1.5 Постановка задачі

1. Вдосконалення настилу пішохідного мосту композиційними матеріалами.
2. Вибір компонентів композиційного матеріалу для настилу пішохідного мосту.
3. Вибір технології виготовлення секцій настилу пішохідного мосту.
4. Визначення переваг і недоліків такого настилу.

					КР.134.4161.01.ПЗ.02								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 2 Вибір та обґрунтування складу, структури композиційного матеріалу для настилу мосту.				Літ.	Арк.	Аркушів		
Студент		Дурневич К.В.									30	68	
Керівник		Соломонюк Н.С.							НУК				
Н. контр.		Захарова І.О.											
Зав. каф.		Коростильов Л.І											

РОЗДІЛ 2. ВИБІР ТА ОБГРУНТУВАННЯ СКЛАДУ, СТРУКТУРИ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ДЛЯ НАСТИЛА МОСТУ.

2.1 Вимоги до експлуатаційних властивостей матеріалу.

Дана конструкція повинна витримувати такі умови експлуатації:

1) Механічні навантаження:

- рівномірно розподілене навантаження від пішоходів $q=16.28$ кН
- вітрове навантаження 2,39 кПа;

2) Зовнішні умови:

- температурний режим роботи від -40 до +50 градусів (згідно з кліматом України – помірно континентальний) ;
- стійкість до ультрафіолету ;
- вологостійкість при 100% вологості ;

2.2 Вибір сполучника

Враховуючи експлуатаційні умови виробу, вибираємо сполучник з термореактивних смол, тому що вони відповідають таким вимогам:

1. Гарна адгезія до армуючого компонента;
2. Висока когезійна міцність (міцність самого матеріалу);
3. Достатня деформаційна здатність (деформація матриці більше або дорівнює деформації волокна);
4. Значення КЛТР матриці близькі до КЛТР волокна;
5. Достатня теплостійкість;
6. Низький ступінь водопоглинання;
7. Гарні характеристики горючості.

Для ПКМ найчастіше використовують наступні смоли [9]:

- епоксидні смоли;
- поліефірні смоли;

					КР.134.4161.01.ПЗ.02	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		31

- фенолформальдегідні смоли;
- кремнійорганічні смоли.

Для даного виробу фенолформальдегідна та кремнійорганічна матриці не будуть розглядатись, тому що вони використовуються для матеріалів загального електротехнічного, конструкційного та аерокосмічного призначення при підвищених температурах.

2.2.1. Епоксидна смола (ЕС)

- високі показники теплоізоляції;
- висока хімічна стійкість;
- добра механічна стійкість;

Можливі технології для волокнистих КМ:

- переробкою намоткою;
- ручною викладкою;
- вакуум формуванням;
- автоклавним формуванням;
- пресуванням.

Недоліки: високі температури твердіння для отримання стабільних властивостей [2].

2.2.2 Поліефірна смола (ПЕС)

Переваги:

- Достатні загально-технічні властивості (міцність, модуль пружності, деформації);
- Простота переробки;
- Низька вартість.

Область використання: човни, автомобілі, труби, елементи літальних апаратів.

Недоліки: Руйнування у присутності окисників, ароматичних розчинників, концентрованих розчинів лугів.

2.3 Вибір наповнювача

Для даного виробу прийнято волокнистий наповнювач. Таким чином отримується армований пластик. Для виготовлення пішохідного моста можна використати склопластик (СП), вуглепластик (ВП) або органопластик (ОП).

2.3.1 Склопластики

Властивості СП [11]:

- Висока міцність;
- Відносно висока демпфуюча здатність (здатність до сприйняття коливань);
- Висока корозійна та хімічна стійкість;
- Високі електроізоляційні властивості;
- Низька теплопровідність та низька густина.

Експлуатаційні властивості СП:

Вплив вологи на властивості СП представлено в таблиці 3.2:

Таблиця 2.1 – Вплив на механічні властивості витримки в воді СП та при високій вологості протягом 10 000 годин. (Коефіцієнт роботи в воді $K_{\sigma} = \frac{\sigma_{10000}}{\sigma_0}$; де σ_0 – короткочасна міцність, $K_E = \frac{E_{10000}}{E_0}$, де E_0 – короткочасний модуль пружності).

Сполучник	Коефіцієнт у воді			Коефіцієнт при вологості 94-98%		
	$K_{\sigma+}$	$K_{\sigma-}$	K_E	$K_{\sigma+}$	$K_{\sigma-}$	K_E
ЕС	0,95	0,90	0,95	0,95	0,95	0,95
ПЕС	0,82	0,75	0,85	0,85	0,80	0,70
ФФС	0,84	0,72	0,75	0,90	0,77	0,60

При висушуванні матеріалу частина механічних властивостей встановлюється, а саме встановлюється міцність та в меншій ступені модуль пружності. Якщо матеріал знаходиться у воді довгий час, то встановлення міцності не відбувається, бо в місцях сполучення матриці та волокна відбувається процес гідролізу апрету.

Вплив температури на властивості СП представлено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Коефіцієнт умов роботи K_T при різних видах напружених станів.

$T, ^\circ\text{C}$	Однонапрямний СП	Перехресне армування (1:1)	Склотекстоліти
Розтягування			
60°C	0,91	0,86	0,95
100°C	0,87	0,81	0,90
Стискання			
60°C	0,61	0,73	0,84
100°C	0,48	0,64	0,66
Вигин			
60°C	0,76	0,87	0,85
100°C	0,45	0,67	0,70
Зріз			
60°C	0,52	0,82	-
100°C	0,51	0,57	-

Коефіцієнт умови роботи при тривалому випробуванні ($\tau=1000$ год) поліефірних СП без навантажень K_T та навантаженими в прісній воді $K_{T,\tau}$. $K_T = \sigma_T / \sigma_0$, де σ_T – короткочасне напруження отримане при температурі T ; $K_{T,\tau} = \sigma_{T,\tau} / \sigma_0$, де $\sigma_{T,\tau}$ – напруження отримані при підвищеній температурі T й при часі витримки τ в прісній воді.

Не залежно від типу склонаповнювача, міцність з підвищенням температури та часу впливу води на матеріал падає однаково швидко.

Вплив ультрафіолету на СП:

Відбувається погіршення міцності СП за рахунок фотостаріння зв'язуючого. Для збереження міцності й товарного вигляду виробу необхідно захищати поверхню.

Таблиця 2.3 - Коефіцієнт умови праці СП в різних кліматичних районах [2]

Матеріал	σ^+		E, G	
	Середня полоса	Південний район	Середня Полоса	Південний район
СП (товщина 2-7 мм)	0,7	0,7	0,8	0,8
СП з хвилястою структурою	0,75	0,65	0,85	0,80

Абразивна дія пилу:

В результаті відбувається викрашування верхніх шарів, порушення захисного покриття. В цьому випадку ПЕС має гірші властивості ніж ЕС [2].

2.3.2 Вуглепластики

Характеризуються [11]:

- Високою міцністю та жорсткістю;
- Низькою густиною;
- Низьким КЛТР;
- Високою тепло та електропровідністю;
- Стійкі до термічного та радіаційного впливу.

Ціна вуглецевого волокна (ВВ) доволі велика:

- вартість ВВ на основі ПАН з $E = 210$ ГПа - 66 \$/кг;
- вартість волокна з пеків з $E = 210$ ГПа - 44 \$/ кг.

Властивості ВВ залежать від типу вихідного волокна та технологічних параметрів його отримання. ВВ мають найвищу анізотропію властивостей, високою термостійкістю в нейтральному середовищі (до 2000°C). На повітрі починає втрачати свої властивості при $T=450^\circ\text{C}$. Особливість ВВ – від’ємний КЛТР в широкому температурному діапазоні.

Властивості ВВКМ залежать від схеми армування. При армуванні 1Д – руйнування крихке. При 2Д – частково крихке. При 3Д - КМ поводить себе як псевдо пластичний матеріал.

Таблиця 2.4 – Властивості ВВКМ в залежності від схеми армування

Схема армування	Тип армуючого матеріалу	$\varphi_{в\%}$	$\sigma_{зг}$, ГПа	$E_{зг}$, ГПа	τ (міжшарові), МПа
1Д	Волокно	55	1,20-1,40	150-200	20-40
2Д	Тканина	35	0,30	60	20-40
3Д	Тканина прошита	50	0,25-0,30	50-150	50-80
Хаотична	Повість	35	0,17	15-20	20-30

2.3.3 Органопластики

Органічні волокна (ОВ) різні за характеристиками: $\delta = 2-25\%$. Властивості ОВ представлені в таблиці 2.5.

Основним недоліком ОВ є низька термостабільність та схильність до набухання. [11]

Таблиця 2.5 – Види та властивості ОВ

Волокно	ρ , г/см ³	σ^+ , МПа	E , ГПа	δ ,%	$T_{\text{експл}}$, °C
ПА	1,14	770-850	3,2-3,5	13-17	170
Лавсан	1,38	480-620	10-11,0	14-15	200
ПП	0,90	450-520	4,6-5,0	22-25	100
ПАН (нітрил)	1,17	460-560	4,6-5,2	16-17	80
Полівініловий спирт	1,26	60-100	25,0	7-12	180
Полі-п-бензамид	1,45	2200-2800	110-160	1-4	300
ПЕФ	0,98	3100-4700	150-170	-	80
Арамідні волокна					
Номекс (США)	1,38	700	12,3	15-20	300
Кевлар 29	1,45	3200	69,0	4	300
Кевлар 49	1,45	3000	124,0	2-3	300
Зверхвисокомодульні	1,40	4500	175,0	2	300
Арімиди (поліімиди)					
Високої міцності	1,45	1000	100-120	6-10	400
Високо-модульні			120-230		

Властивості ОП:

- 1) ОВ мають високі сорбційні властивості. Звідси пористість ОП не більше 2%. [12]
- 2) Так як границя між матрицею та оргволоконнами підрозчинена, то вірогідність зародження тріщин мал. Звідси підвищення механічної міцності та зменшення розкид властивостей. (Для ОП розкид властивостей 5%, для СП – до 30%). [2]
- 3) До основних переваг ОП відноситься висока ударна в'язкість:
ОП на основі кевлару $a_k=750$ кДж/м²; на основі нейлону $a_k=1950$ кДж/м²; на основі лавсану $a_k=650$ кДж/м². Тоді коли у БП: $a_k=84$ кДж/м², ВП : $a_k=42$ кДж/м²
- 4) Довгострокова міцність ОП: при динамічному навантаженні ОП з кевлара має високі механічні характеристики $\sigma(N=10^7)=240$ МПа. [2]
- 5) Водопоглинання ОП нижче ніж у СП за рахунок низької поруватості.
ОП на основі капрону та ФФС має водопоглинення нижче ніж у ОП на основі капрону та ЕС. []
- 6) Коефіцієнт теплопровідності в 2 рази нижче ніж у СП та сильніше залежить від температури. []

2.4 Порівняння властивостей армованих пластиків

Міцність ОП на основі арамідних волокон не уступають іншим ПКМ, але жорсткість та міцність на стискання краще у ВП [13].

Таблиця 2.6 – Порівняння властивостей ОП зі СП та ВП

Властивості	ОП (з кевларом)	СП (високомодульним СВ)	ВП (високомодульним ВВ)
ρ , г/см ³	1,38	2,04	1,57
$\sigma_{\parallel}^+$, МПа	2200	2100	1430
$\sigma_{\perp}^+$, МПа	28	40	38
$E_{\parallel}^+$, ГПа	95	70	178

Властивості	ОП (з кевларом)	СП (високомодульним СВ)	ВП (високомодульним ВВ)
$E_{\perp}^+$, ГПа	5,5	12,0	9,8
$\sigma_{\parallel}^-$, МПа	310	590	1300
$\sigma_{\perp}^-$, МПа	130	140	140
τ , МПа	45	63	63

2.5 Вибір матеріалу та данні для компонентів матеріалу конструкції

Для виготовлення пішохідного моста обрано склопластик. Даний вибір пов'язан з тим, що він є більш доступним в економічному плані у порівнянні з органопластиком та вуглепластиком, а також властивості СП задовольняють експлуатаційним характеристикам конструкції та можливості використання подальшого методу формування у виріб.

У якості сполучника прийнято поліефірну смолу. Вона має достатні загально-технічні властивості: міцність, модуль пружності, деформації, низьку вартість, а головне використовується при подальшому методі формування у виріб.

2.5.1 Вихідні дані наповнювача

В якості наповнювача для склопластику було обрано біаксиальна тканина з Е-скла **Арматон марки ВХМ-800 (0°/90°)** виробництва VECTORFUSION E-BXCFM 1710 з такими фізико-механічними характеристиками (таблиці 2.7 та 2.8):

Таблиця 2.7 – Фізико-механічні характеристики склотканини Арматон марки ВХМ-800 (0°/90°)

Характеристика	Числове значення
Щільність тканини, г/м ²	800
Орієнтація шарів	0°/90°
Ширина, см	1524± 1
Поверхнева щільність шарів, г/м ²	320/240/320

Розривне навантаження, Н/5 см	5733/6747
Товщина, мм	1,524

Відносний вміст по об'єму волокна в елементарному шарі тканини
 $V=0,45$.

Таблиця 2.8 – Фізико-механічні характеристики скляного волокна з Е-скла

Властивості волокна	Числові значення
Густина (ρ_v), г/см ³	2,54
Міцність при розтягуванні (σ_v^+), МПа	3 450
Модуль пружності при розтягуванні (E_v^+), ГПа	72
Коефіцієнт Пуассона (μ_v)	0,238
Модуль зсуву волокна (G_v), МПа	30 000
Відносний вміст по об'єму волокна в елементарному шарі (V_v), %	45
Відносне подовження (δ_v), %	4,8

2.5.2 Вихідні дані сполучника

В якості сполучника для даного склопластику обрано термореактивну вінілефірну смолу, яка використовується при інжекційній технології формування, марки **Polipol 335**. Характерні та фізико-механічні властивості даного сполучника наведені в (табл. 2.9 та 2.10):

Таблиця 2.9 – Властивості смоли марки Polipol 335

Показник	Значення	Одиниця вимірювання	Метод
Щільність	1,08±5%	г/см ³	ISO 1675
Індекс заломлення	1,534±5%		ISO0489
Кислотний індекс	20±20%	mg KOH /г	ISO2114
Вязкість по Брукфілду	150±30%	ср at 23°C	ISO 2555
Вміст стиролу	44±12%	%	
Час гелеотримання	25±40%	хв	ISO 2535
Гарантійний термін придатності	6 місяців при 20°C, за відсутності прямих сонячних променів		

Таблиця 2.10 – Фізико-механічні властивості затверділої вінілефірної смоли

Показник	Значення	Одиниця вимірювання	Метод
HDT	63±10%	°C	ISO 0075-A
	76±10%	°C	ISO 0075-B
Коефіцієнт водопоглинання	0,17±10%	%	ISO 0062
Твердість по Барколю	44±10%		ASTM D 2583
Повна об'ємна усадка	8,4±10%	%	ISO 3521
Модуль пружності при згинанні	4100±10%	МПа	ISO 0178
Міцність при згинанні	120±10%	МПа	ISO 0178
Подовження при розриві	3,45±10%	%	ISO 0178
Розривне навантаження	63±10%	МПа	ISO 0527
Модуль пружності при розтягуванні	3000±10%	МПа	ISO 0527
Ударна міцність	10±10%	кДж/м²	ISO 0180

В якості твердника для даної смоли було обрано твердник нафтенат кобальта . Даний твердник призначений для твердіння вінілефірних смол.

2.6 Заповнювач для тришарової конструкції

В якості заповнювача обрано конструкційний пінопласт марки Airex C70.55 S 20 mm [14]. Технічні характеристики наповнювача наведені в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Технічні характеристики пінопласту [15]

Назва показника	Числове значення
Щільність, (кг/м³)	60
Міцність на стискання, (МПа)	0,9
Модуль стискання, (МПа)	69
Міцність на розтягування, (МПа)	1,3
Модуль пружності, (МПа)	45
Міцність на зсув, (МПа)	0,8
Модуль зсуву, (МПа)	22
Подовження при зсуві, (%)	16

2.7 Додаткові матеріали, що використовуються в технології формування виробу

2.7.1 Антиадгезив

В якості антиадгезиву обрано Hi-Low 1000 – антиадгезійний матеріал, продукт сучасної хімії. Він може використовуватися при всіх температурах: високій, низькій, або кімнатній. Даний антиадгезійний матеріал включає в себе компоненти, виготовлені синтезом з вугілля. Ці вуглецеві сполуки є повністю синтетичними, тому типові натуральним воском якісні коливання в них не зустрічаються. Найважливішими властивостями синтетичних антиадгезійних матеріалів є висока точка плавлення і твердість. Ці та інші переваги забезпечують блиск, щільність покриття і високу тепло- і водостійкість. Віск засихає миттєво, утворюючи тверду поверхню, завдяки чому можливі повторні формувань.

Переваги:

- Серійність у виготовленні виробів (5-10 знімів). Надалі необхідно оновлення покриття;
- Глянець поверхні

Недоліки:

- Трудомістке нанесення;
- Скупчення воску на поверхні оснастки;
- Обмежена кількість знімів;
- Необхідність очищення поверхні виробу при необхідності його подальшої забарвлення.

Область застосування обмежений лише температурою плавлення воску.

2.7.2 Гелькоут

В якості гелькоута було обрано таку марку CRYSTIC 65 PA.

Це тиксотропний ізофталевий поліефірний гелькоут. Призначений для нанесення пензлем.

Особливості та переваги:

Володіє винятковими захисними властивостями і механічними характеристиками, високою стійкістю до ультрафіолетового випромінювання і хімічного впливу. Гелькоут рекомендується для використання в будівельних і морських конструкціях, що працюють в умовах жорсткого атмосферного впливу і знаходяться тривалий час у контакті з водою.

Рекомендації по твердінню:

Ретельно підібраний склад Crystic 65PA забезпечує прекрасні споживчі властивості: гелькоут не стікає з похилих і вертикальних площин, має гарну покривістість та змачуваність, володіє коротким часом гелеутворення і гарну адгезію до ламінату.

Гелькоут перед використанням повинен мати температуру робочого приміщення: 18 - 20 °С. Перед використанням гелькоут необхідно ретельно перемішати до отримання однорідної маси, це особливо важливо, коли використовуються пігментні пасти. Найкращий результат дають механічні мішалки. Перемішування не повинно бути занадто інтенсивним, щоб уникнути насичення гелькоута повітрям. Для початку реакції затвердіння гелькоут Crystic 65PA вимагає тільки додавання каталізатора. Рекомендований каталізатор - каталізатор М або Бутанокс М50, що додається в гелькоут в кількості 2%.

Системи твердіння:

Crystic 65PA затверджується пероксидами стандартної активності - 50% пероксиду метилетилкетону. Рекомендується використовувати такі твердники стандартної активності - 50% розчини ПМЕК: МЕКР-НА-2, Luperox GZ-S, Butanox M50, Curox M300, NORPOL Peroxide N 1 і т.д.

Рекомендоване дозування для звичайних умов: 2 вагових частини каталізатора стандартної активності (50%) на 100 частин Crystic 65PA. Використання отверждающих агентів зниженої активності - 30% розчин

ПМЕК - призводить до отримання неоптимальних властивостей

отвержденного гелкоута.

Життєздатність:

У таблиці 2.13 представлено час гелеутворення 100 г гелкоута Crystic 65PA, що містить 2 г твердника (Luperox GZ-S, Butanox M50), залежно від температури.

Таблиця 2.13 – Час гелеутворення гелкоута

Температура	Час гелеутворення
15°C	24 хв.
20°C	15 хв.
25°C	9 хв.

Перед початком твердіння температура гелкоута, форми і робочого приміщення повинна бути не нижче 15 °C.

Crystic 65PA буває в двох варіантах - незабарвленому і пофарбованому. При необхідності незабарвлений гелкоут Crystic 65PA може бути пофарбований додаванням 10% пігментних паст Crystic.

Характерні властивості

У таблиці 2.14 та 2.15 наведено характерні властивості гелкоута Crystic 65PA, отримані при тестуванні відповідно до Британського стандарту BS2782.

Таблиця 2.14 – Властивості рідкого гелкоута Crystic 65PA [16]

Властивість	Одиниця виміру	Рідкий гелкоут
Вязкість при 25°C		Тиксотропний
Питома маса при 25°C		1.11
Вміст летких речовин	%	34
Час гелеутворення при 25 °C і використанні 2% каталізатора М	Хвилини	9
(Бутанокс М500)	Місяці	3

Таблиця 2.15 – Властивості затверділого гелкоута

Властивість	Одиниця виміру	Повністю затверділий гелкоут* (ненаповнене лиття)
-------------	----------------	---

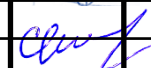
Властивість	Одиниця виміру	Повністю затверділий гелькоут* (ненаповнене лиття)
Твердість по Барколу (модель GYZJ 934-1)		42
Водопоглинання за 24 год при 23 ° С	мг	18
Деформаційна теплостійкість (1.80 МПа)	°С	75
Подовження при розриві	%	3.0
Міцність при розтягуванні	МПа	75
Модуль пружності при розтягуванні	МПа	3500

Схема твердіння:

- 24 години – при температурі 20°C,
- 5 годин – при 80°C,
- 3 години – при 120°C

2.8 Висновки за розділом

- 1 Для виготовлення пішохідного мосту обрано склопластик.
- 2 В якості наповнювача для склопластику було обрано мультиаксиальна тканина з Е-скла, а саме – біаксиальна тканина виробництва VECTORFUSION E-BXCFM 1710 Даний вибір пов'язан з тим, що він є більш доступним в економічному плані у порівнянні з органопластиком та вуглепластиком, а також властивості СП задовольняють експлуатаційним характеристикам конструкції.
- 3 У якості сполучника прийнято поліефірну смолу марки Polipol 335. Вона має підходящі загальнотехнічні властивості: міцність, модуль пружності, деформації, низьку вартість.

					КР.134.4161.01.ПЗ.03								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 3 Розрахунок конструкційних деталей пішохідного мосту з ПКМ				Літ.	Арк.	Аркушів		
Студент		Дурневич К.В.									45	68	
Керівник		Соломонюк Н.С.							НУК				
Н. контр.		Захарова І.О.											
Зав. каф.		Коростильов Л.І											

РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ ПІШОХІДНОГО МОСТУ З ПКМ

3.1 Підбір параметрів поперечного перерізу секції мосту

3.1 Пружні характеристики та характеристики міцності для склопластикових деталей мосту.

3.1.1 Зовнішні навантаження

Розраховано, кожна секція мосту має довжину 3 м і є шарнірно опертою. Отже секція мосту – шарнірно оперта статично визначена балка з рівномірно розподіленим навантаженням $p = 4,07$ кПа згідно [17].

У аварійній ситуації вантові канати можуть обірватись і секція мосту залишиться підпорках сусідніх секцій тому розглядається випадок вільного опирання секції по її краях (рис.3.1) [18].

Погонне зусилля на пластині прольоту за умови тиску на настил мосту $p = 4,07$ кПа буде

$$q = p \cdot L = 4,07 \cdot 4 = 16,28 \text{ кН/м} \quad (3.1)$$

Знайдемо поперечну силу Q , та згинальний момент M :

Максимальна перерізувача сила на епюрі Q

$$Q_{max} = \frac{qL}{2} = \frac{16,28 \cdot 3}{2} = 24,4 \text{ кН} \quad (3.2)$$

Максимальний вигинаючий момент

$$M_{max} = \frac{qL^2}{8} = \frac{16,3 \cdot 3^2}{8} = 18,3 \text{ кН} \cdot \text{м} \quad (3.3)$$

Небезпечними перерізи балки будуть центр балки та т.А,В.

Центр балки	Перерізи А і В
$M_{max} = 18,3 \text{ кН} \cdot \text{м}$	$M = 0 \text{ кН} \cdot \text{м}$
$Q = 0 \text{ кН}$	$Q_{max} = 24,4 \text{ кН}$

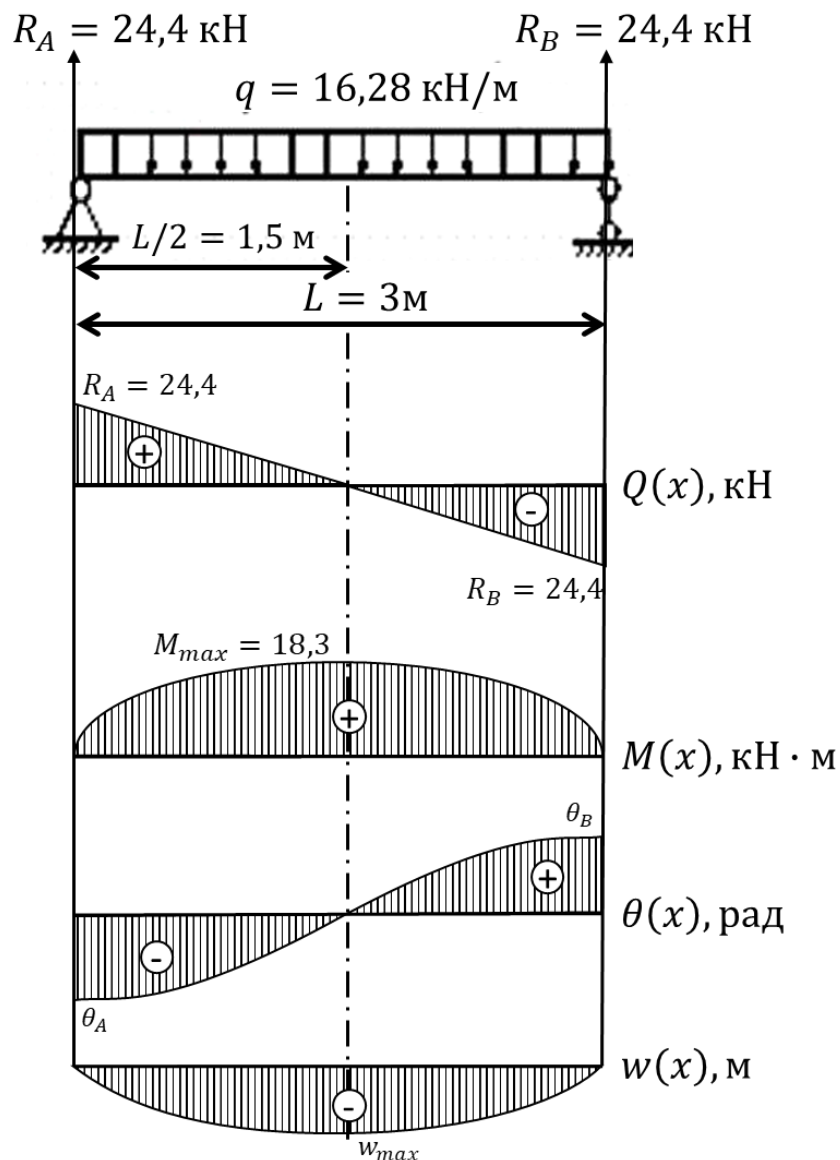


Рисунок.3.1 – Схема навантаження балки з епюрами перерізувальної сили Q , вигинаючого моменту M , кута повороту θ та прогину w .

3.2 Вибір поперечного перерізу секції

Вид поперечного перерізу секції мосту представлено на рис.3.1

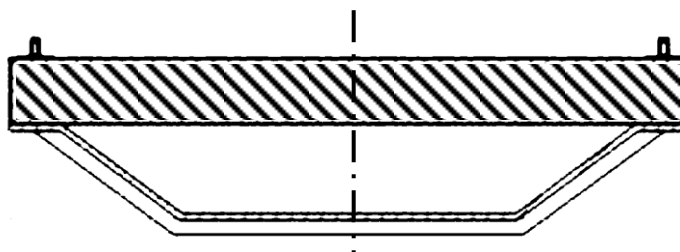


Рисунок.3.2 - Поперечний переріз секції мосту

Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата

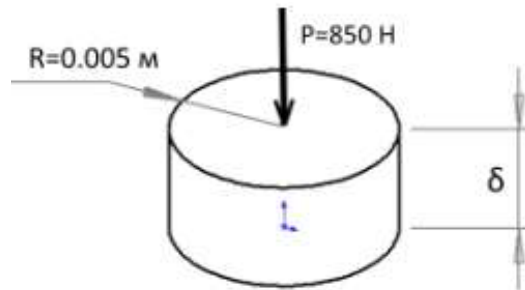
КР.134.4161.01.ПЗ.03

Лист

47

3.2.1 Вибір товщині несучого склопластикового шару від місцевого навантаження

Розглянемо поведінку верхнього несучого шару конструкції при критичному навантаженні від тонкого підбору взуття (рис.3.3). Розглядається



навантаження на зріз та зминання склопластикового шару.

Рисунок. 3.3 – Схема критичного навантаження

Розраховується товщина шару склопластика на зминання:

$$\frac{P}{\pi R^2 \delta} \leq [\sigma_{зм}] \quad (3.4)$$

Допустиме значення напруження на зминання:

$$[\sigma_{зм}] = 2,5[\sigma] \quad (3.5)$$

де $[\sigma]$ – критичне напруження на стискання.

З формул (3.4) та (3.5) можна знайти мінімальну товщину склопластикового шару від контактних місцевих напружень на зминання

$$\delta \geq \frac{10P}{\pi R^2 2,5[\sigma]} = \frac{850}{\pi \cdot 0,005^2 \cdot 2,5 \cdot 1580 \cdot 10^6} = 0,011 \text{ м} = 11 \text{ мм} \quad (3.6)$$

Перевіряється міцність склопластикового шару від зрізу

$$\frac{P}{2R\delta} \leq [\tau] \quad (3.7)$$

де $[\tau]$ – критичне напруження на розтяг.

$$\delta \geq \frac{P}{2R[\tau_{зр}]} = \frac{850}{2 \cdot 0,005 \cdot 40 \cdot 10^6} = 0,0021 \text{ м} = 2,1 \text{ мм} \quad (3.8)$$

Отже несучий шар тришарового настилу мосту повинен бути не тонше 9 мм.

3.2.2 Розрахунок поперечного перерізу секції мосту за жорсткістю конструкції

З урахуванням значення товщини несучого шару отриманого з виразу (3.6) знайдемо загальну товщину тришарової композитної балки не враховуючи наповнювач – пінополістирол.

Прогин балки від дії рівномірно розподіленого навантаження q не повинен перевищувати значення $1/200$ від довжини прольоту [19]:

Умова міцності при згинанні композитної балки має вигляд

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} \leq [\sigma] \quad (3.10)$$

За допомогою програмного забезпечення MathCad розраховано оптимальну кількість і розташування шарів настилу мосту.

Для цього за вихідними даними для компонентів композиційного матеріалу, підбраного у розділі 2 знаходяться фізико-механічні характеристики шарів КМ.

Для непарних шарів:

Границя міцності при розтягненні

$$\sigma_1 = \sigma_{11}\theta_1 + \sigma_{12}(1 - \theta_1) = 1580 \text{ МПа}$$

Модуль пружності при розтягненні

$$E_1 = E_{11}\theta_1 + E_{12}(1 - \theta_1) = 35 \text{ ГПа}$$

Коефіцієнт Пуассона

$$\mu_1 = \mu_{11}\theta_1 + \mu_{12}(1 - \theta_1) = 0,25$$

Для парних шарів:

Границя міцності при розтягненні

$$\sigma_2 = \sigma_{21}\theta_1 + \sigma_{11}(1 - \theta_1) = 1320 \text{ МПа}$$

Модуль пружності при розтягненні

$$E_2 = E_{21}\theta_1 + E_{11}(1 - \theta_1) = 30 \text{ ГПа}$$

Коефіцієнт Пуассона

$$\mu_2 = \mu_{21}\theta_1 + \mu_{11}(1 - \theta_1) = 0,28$$

					КР.134.4161.01.ПЗ.03	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		49

Властивості пінопласту представлені у таблиці 2.11.

Міцність несучих шарів (вони є однаковими) буде

$$\begin{aligned}\sigma_{1\text{СП}} &= \frac{1}{15\delta_{\text{шар}}} (8\sigma_1\delta_{\text{шар}}\cos^2 0^\circ + 7\sigma_2\delta_{\text{шар}}\cos^2 90^\circ) \\ &= \frac{1}{15} (8\sigma_1\cos^2 0^\circ + 7\sigma_2\cos^2 90^\circ) = 843 \text{ МПа}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{2\text{СП}} &= \frac{1}{15\delta_{\text{шар}}} (8\sigma_1\delta_{\text{шар}}\sin^2 0^\circ + 7\sigma_2\delta_{\text{шар}}\sin^2 90^\circ) \\ &= \frac{1}{15} (8\sigma_1\sin^2 0^\circ + 7\sigma_2\sin^2 90^\circ) = 616 \text{ МПа}\end{aligned}$$

Для розрахування геометричних параметрів поперечного перерізу настилу мосту розраховано координати центрів шарів (рис.3.3)

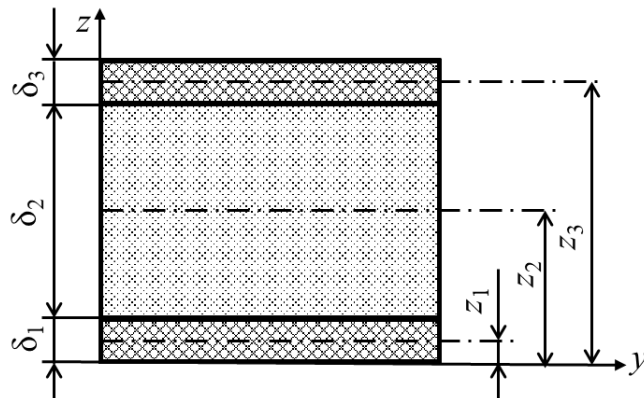


Рисунок 3.3 – Поперечні розміри шарів настилу мосту

верхнього

$$z_1 = \frac{t_0}{2} = 5,5 \text{ мм}$$

нижнього

$$z_2 = t_0 + \frac{t_2}{2} = 36 \text{ мм}$$

заповнювача

$$z_3 = t_0 + t_2 + \frac{t_3}{2} = 68,5 \text{ мм}$$

Інваріанти та жорсткості шарів КМ:

Жорсткість на розтягнення-стискання

Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата

КР.134.4161.01.ПЗ.03

Лист

50

$$I_0 = B = \sum_{i=1}^3 (E_i F_i) = B = 3370 \text{ МН}$$

Перший інваріант

$$I_1 = \sum_{i=1}^3 (E_i S_i) = \sum_{i=1}^3 (E_i F_i z_i) = 125 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

Ексцентриситет перерізу буде

$$e = \frac{I_1}{I_0} = 37 \text{ мм}$$

Другий інваріант для кожного шару перерізу

$$I_2 = \sum_{i=1}^3 \left[E_i \left(\frac{\Delta \cdot (\delta_i)^3}{12} + F_i z_i^2 \right) \right] = 7,88 \text{ МН} \cdot \text{м}^2,$$

Жорсткість на вигин для перерізу

$$D = I_2 - \frac{I_1^2}{I_0} = 3,27 \text{ МН} \cdot \text{м}^2$$

Модулі зсуву для шарів будуть

$$G_i = \frac{E_i}{2(1 + \mu_i)}$$

$$G_1 = G_3 = 14 \text{ ГПа}, G_2 = 16,7 \text{ МПа}$$

Жорсткість на зсув буде

$$K = \frac{\Delta^2}{\sum_{i=1}^3 \frac{\delta_i}{\Delta G_i}} = 21360 \text{ МН}$$

Отже для балки на рисунку 3.1 визначено кут повороту і максимальний прогин, що задовольнятиме умові жорсткості за формулами

$$\theta(x) = \theta_0 + \frac{1}{D} \left(R_A \frac{x^2}{2} - q \frac{x^3}{6} \right) + \frac{1}{K} (R_A - qx)$$

$$w(x) = \theta_0 x + \frac{1}{D} \left(R_A \frac{x^3}{6} - q \frac{x^4}{24} \right) + \frac{1}{K} \left(R_A x - q \frac{x^2}{2} \right)$$

θ_0 знаходиться з умови $w(L) = 0$, і буде $\theta_0 = -0,011 \text{ рад} \approx 0,63^\circ$

Максимальний прогин буде $w_{max} = w\left(\frac{L}{2}\right) = 11 \text{ мм} < \frac{L}{200} = 15 \text{ мм}$

Підібрано наступний пакет КМ представлений у таблиці 3.1

					КР.134.4161.01.ПЗ.03	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		51

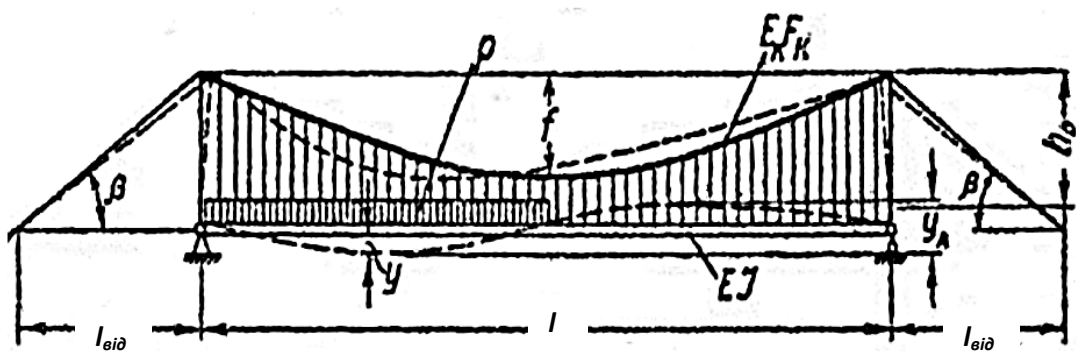
Таблиця 3.1- Пакет тришарової конструкції для настилу мосту

№ шару	Матеріал	Кут армування	Товщина, мм
1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15	Біаксиальна тканина ВХМ-820	0	0,74
2, 4, 6, 8, 10, 12, 14	Біаксиальна тканина ВХМ-820	90	0,74
16	Пінопласт ППУ-3С	0	50
17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31	Біаксиальна тканина ВХМ-820	0	0,74
18, 20, 22, 24, 26, 28, 30	Біаксиальна тканина ВХМ-820	90	0,74
Загальна товщина			72,2

3.3 Формули розрахунку висячих мостів без урахування прогину

Для розрахунку висячого мосту необхідно обчислити допоміжні характеристики L , ω_0 . Величина $L=2 l_{\text{від}}+l$ (рис.3.4) є загальною довжиною кабелю мосту між точками закріплення його в анкерах і визначається за формулою:

$$L = l \sqrt{1 + \frac{16f^2}{3l^2}} + \sqrt{h_0^2 + l_{\text{від}}^2} = 30 \sqrt{1 + \frac{16 \cdot 3^2}{3 \cdot 30^2}} + \sqrt{7,4^2 + 7,4^2} = 41,3 \text{ (м)}$$



$$f = \frac{l}{10} = 3 \text{ м} - \text{стріла прогину основного канату посередині мосту}$$

Рисунок 3.4 – Розрахункова схема висячого мосту

Характеристики ω_0 залежать від геометричних розмірів моста, жорсткості балки EI , характеристики поперечного перерізу кабелю $E_k F_k$ і визначаються за формулами:

$$\omega_0 = \frac{64 E_k F_k l f^2}{DL} = \frac{16 E_k \pi d^2 l f^2}{DL} = \frac{64 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot \pi \cdot 0,027^2 \cdot 30 \cdot 3^2}{3,27 \cdot 10^6 \cdot 41,3} = 14,6 \cdot 10^3$$

Вибрано несучий канат с параметрами: діаметром 27 мм та розривним зусиллям 387,5 кН [20]. Допустиме зусилля береться з коефіцієнтом запасу 1,5

Зусилля і деформації в елементах висячого мосту зазвичай визначають при наступних завантаженні прольоту.

а) Зовнішні сили від завантаженості половини прольоту (від опори до середини, тимчасової, рівномірно розподіленим навантаженням.

Розпір кабелю від тимчасового навантаження:

$$H_{op} = p \alpha_0 l = 240 \text{ кН} < \frac{387,5}{1,5} = 258 \text{ кН}$$

$$\alpha_0 = \frac{8,33 \cdot 10^{-3}}{\frac{1}{\omega_0} + 8,33 \cdot 10^{-3}} = 0,992$$

Згинальний момент в середині прольоту балки жорсткості

$$M_0 = \frac{p \alpha_0 l^2}{8} = \frac{16,28 \cdot 10^3 \cdot 0,992}{8} \cdot 30^2 = 1790 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Прогин в середині прольоту:

$$w_0 = \frac{p \alpha_0 l^4}{78 D} = \frac{16,28 \cdot 10^3 \cdot 0,978 \cdot 30^4}{78 \cdot 3,27 \cdot 10^6} = 0,104 \text{ м} < \frac{l}{200} = 0,150 \text{ м}$$

б) Завантаженість всього прольоту тимчасової, рівномірно розподіленим навантаженням

Розпір кабелю від завантаження тимчасовим навантаженням половини прольоту:

$$H_0 = \frac{p \alpha_0 l}{2} = \frac{16,28 \cdot 10^3 \cdot 0,992 \cdot 30}{2} = 120 \text{ кН}$$

Згинальний момент в чверті прольоту:

$$M_0 = pl^2 \left(6,25 \cdot 10^{-3} - \frac{\alpha_0 \cdot 9,275 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 2017 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Прогин в чверті прольоту під навантаженням:

$$y_0 = \frac{pl^4}{D} 10^{-6} \left(5,046 - \frac{0,979 \cdot 9,275}{2} \right) = \frac{16,28 \cdot 30^4}{3,27 \cdot 10^6} \left(5,046 - \frac{0,978 \cdot 9,275}{2} \right) \\ = 0,127 \text{ м} < \frac{L}{200} = 0,15 \text{ м}$$

3.4 З'єднання секцій

Розрахунок міцності на зріз та зминання вузла з'єднання секцій мосту (рис.3.4)

$$\tau_{зр} = \frac{P}{F_{зр}} = \frac{qb}{t\Delta} \leq [\tau_{зр}]$$

$$F_{зр} = t\Delta = 0,072 \cdot 4 = 0,288 \text{ (м)}$$

де $\Delta = 4 \text{ м}$ – ширина мосту, t – товщина несучого шару у тришаровій панелі.

$$\tau_{зр} = \frac{16280 \cdot 0,2}{0,288} = 0,011 \text{ МПа} < [\tau_{зр}] = 40 \text{ МПа}$$

Розрахунок міцності на зріз та зминання вузла з'єднання секцій мосту

$$\sigma_{зм} = \frac{P}{F_{зм}} = \frac{P}{b\Delta} \leq [\sigma_{зм}] = 616 \text{ МПа}$$

де $b = 200 \text{ мм}$ – конструктивно принята ширина місця з'єднання секцій мосту.

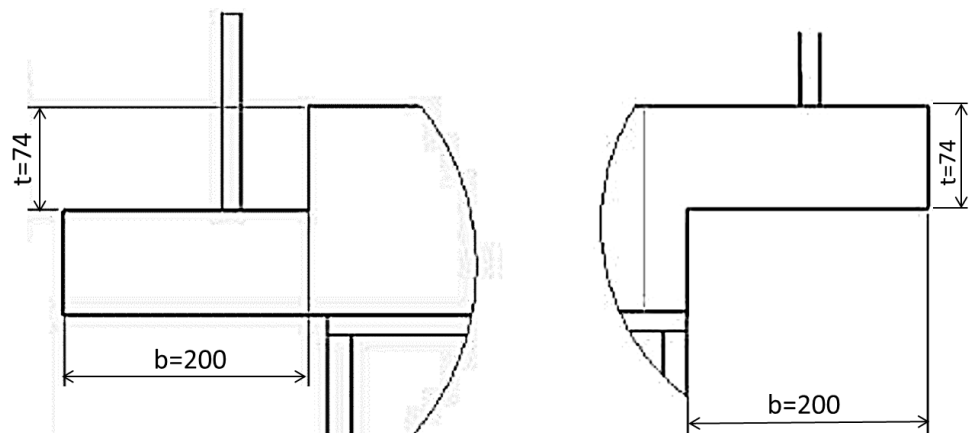
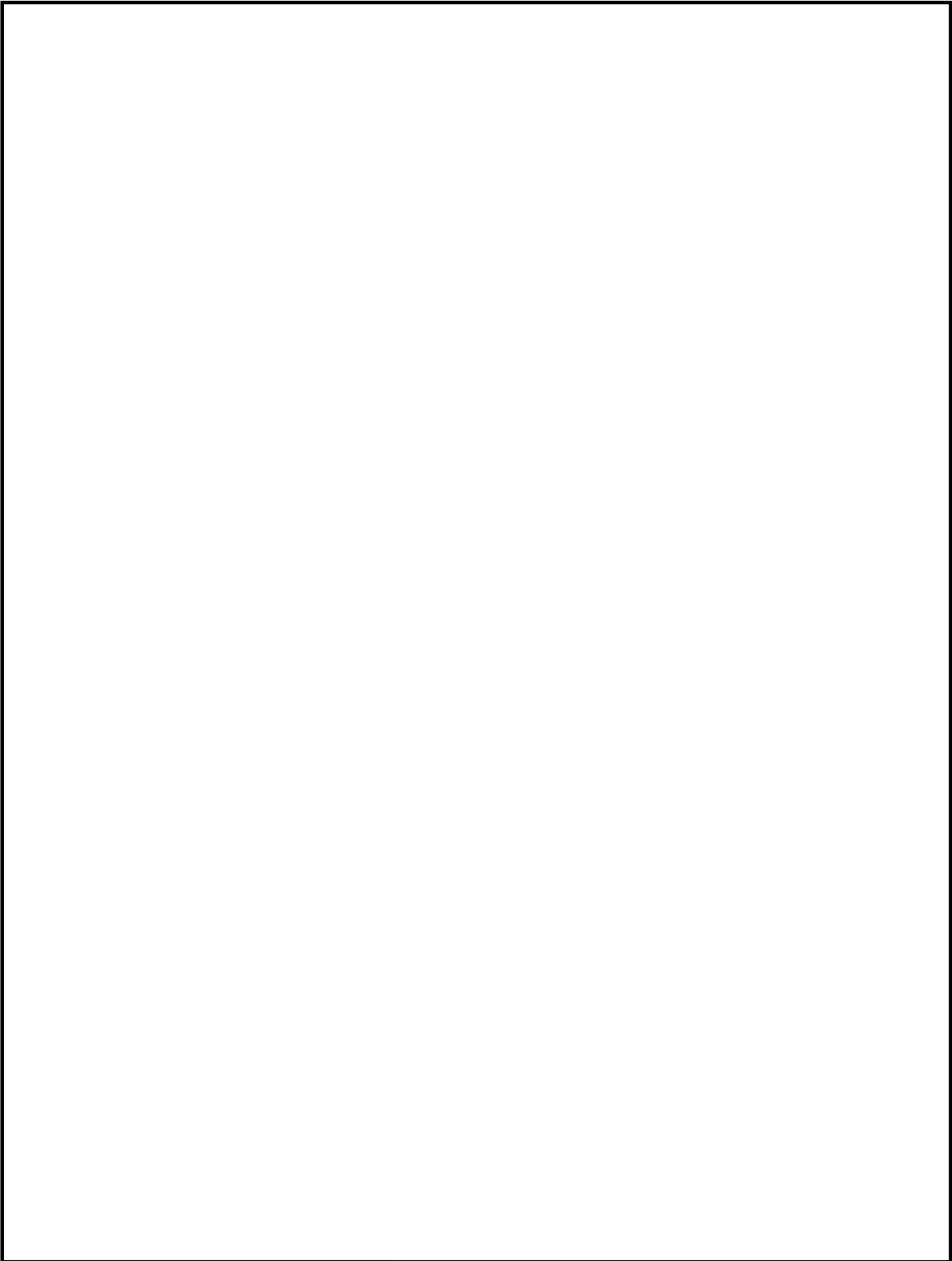


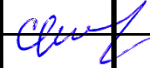
Рисунок.3.5 - Вузол з'єднання секцій мосту

$$\sigma_{зм} = \frac{24400}{0,2 \cdot 4} = 0,31 \text{ МПа} < [\sigma_{зм}] = 1320 \text{ МПа}$$

3.5 Висновки за розділом

1. Для підвісного мосту вибрано параметри перерізу тришарової конструкції для настилу мосту: товщина несучих шарів зі склопластику буде 11 мм, заповнювач – пінопласт має товщину 50 мм.
2. Довжина мосту з розпірними вантами складає 105,4 м. При аварійній ситуації, коли міст наполовину завантажений, прогин буде 21 мм, при повному навантаженні 104 мм, що у обох випадках задовольняє умовам жорсткості.
3. Перевірено міцність тришарової конструкції у вузлі з'єднання секцій мосту на зріз і зминання.



					КР.134.4161.01.ПЗ.04								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 4 Технологія виготовлення секції настилу мосту				Літ.	Арк.	Аркушів		
Студент		Дурневич К.В.									56	68	
Керівник		Соломонюк Н.С.							НУК				
Н. контр.		Захарова І.О.											
Зав. каф.		Коростильов Л.І											

РОЗДІЛ 4. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ СЕКЦІЇ НАСТИЛУ МОСТУ

На вибір методу виготовлення впливають наступні фактори:

1. Необхідні властивості й ступінь відповідальності конструкцій (властивості визначаються типом наповнювача, тиском обпресування, схемою армування).
2. Геометрія виробу і його розміри.
3. Вимоги до якості зовнішньої й внутрішньої поверхні виробу.
4. Серійність виробу.
5. Середовище експлуатації.

Технологічний процес характеризується технологічними параметрами, основними з яких є:

- температура викладки (формування) ;
- режим формоутворення (температура та тиск, або залежність їх змінювання у часі);
- температура твердіння (температурний режим твердіння у часі) ;
- режим охолодження.

4.2 Можливі технології виготовлення конструкції

4.1.1 Метод контактного формування

Метод контактного формування (Hand lay-up) відноситься до найбільш простих і поширених способів виготовлення корпусних конструкцій. Спосіб не передбачає використання силового впливу на обпресування викладеного й просоченого матеріалу й використовує недорогі сполучники й армування [21].

Сутність способу полягає в наступному. На формотворне оснащення, оброблене антиадгезивом і покрите гелевим смоляним шаром укладається попередньо просочений армуючий матеріал (або сухий, що просочується

потім на матриці за допомогою кистей, шпателів або спеціальних валиків). Після цього здійснюється ущільнення ламінату й видалення затриманого повітря за допомогою тих же шпателів або спеціальних валиків (рис.3.1). Операції повторюються до досягнення пакетом необхідної товщини. Після твердіння, що відбувається, як правило, при цеховій температурі, напилюють внутрішній смоляний шар (топкоут), що захищає виріб від проникнення води й перешкоджає випару стиролу зі сполучника. Однак ця операція не є обов'язковою.

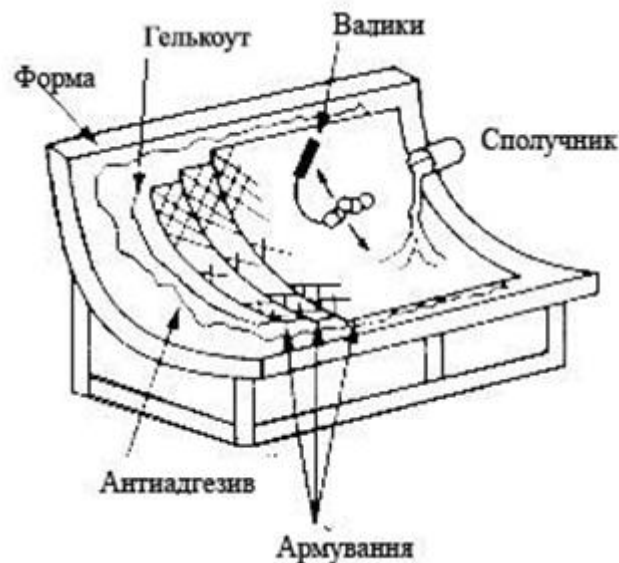


Рис.4.1. Схема контактного формування

Переваги способу:

- універсальність методу;
- можливість одержання виробів складної форми й великого розміру;
- мінімальні капіталовкладення в устаткування (низька вартість оснащення, мінімальна вартість виробів) ;
- короткий підготовчий період (до пуску в серію) ;
- можливість введення додаткових закладних деталей і арматури;
- метод прийнятний для виготовлення дослідних виробів;
- не потрібен кваліфікований персонал. простота навчання.

Недоліки:

- низька продуктивність, значна трудомісткість;

- залучення одночасно великої кількості робітників при великих габаритах виробу;
- однобічна гладка поверхня;
- залежність якості виробу від кваліфікації, сумлінності й акуратності робітника;
- неоднорідність і низька якість пластику, мінливість товщини;
- виробництво шкідливо для здоров'я та оточуючого середовища; потрібні спеціальні міри захисту (витяжки, фільтри та інше);
- утворення відходів (при обрізці припусків).

Низька міцність ламінату обумовлена використанням хаотичного армування та низьким об'ємним вмістом волокна (16-25%).

Не дивлячись на значні недоліки, спосіб вельми популярний завдяки простоті. За деякими оцінками він займає 65% ринку композитів.

4.1.2 Вакуумне формування

Метод вакуумного формування (vacuum bagging) припускає ущільнення пакета тиском, що чинить на викладений пакет ізостатичний зовнішній вплив атмосфери при відкачуванні повітря з герметичної порожнини між матрицею й еластичною перегородкою (рис.4.2). При цьому не застосовується додатковий зовнішній тиск. Спосіб простий у реалізації; не вимагає міцного й жорсткого оснащення через незначні навантаження. На відміну від автоклавного формування, майже не використовується дамба.

Наведена вище узагальнена схема викладення технологічного пакета при пружному формуванні може бути спрощена. Вбираючий шар може одночасно нести функції дренажного, не завжди використовується і жертвний шар, і, у свою чергу, при застосуванні жертвового шару можна не накривати його перфорованим (рис. 4.3).

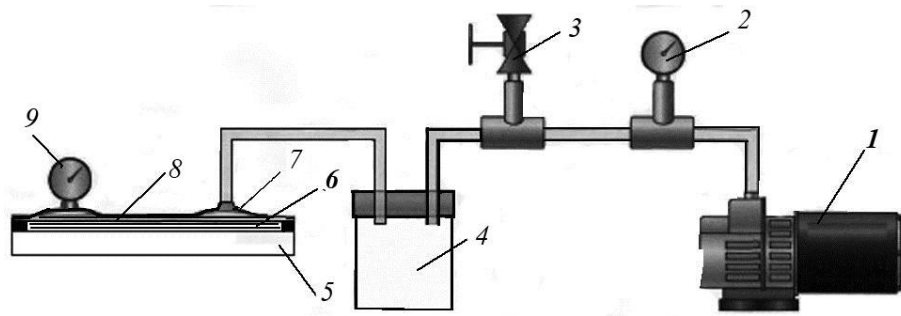


Рис. 4.2. - Схема обладнання для вакуумного формування

1 – вакуумний насос; 2– вакуумний манометр; 3 – кран; 4 – пастка для сполучника; 5 – форма; 6 – еластичний пуансон; 7– штуцер вакуумної магістралі; 8 – ламінат, що формується; 9 – вакуумний манометр.

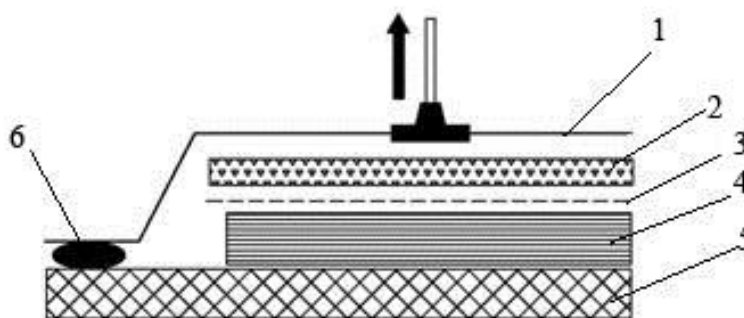


Рис.4.3. Типова схема викладки технологічних шарів при вакуумному формуванні:

1 – вакуумна діафрагма (мішок); 2 – шар, що всмоктує; 3 – жертвний шар і/або перфорована плівка; 4– пакет, що формується; 5 – форма; 6 – ущільнювач.

Переваги способу:

- Більш високі фізико-механічні характеристики матеріалу, зокрема, питома жорсткість і питома міцність пластику зростають в 2-3 рази в порівнянні з контактним способом формування.
- Низьке водопоглинання армованого пластику.
- Нескладне технологічне оснащення.
- Можливість виготовлення великогабаритних виробів.
- Простота в здійсненні.

– Відсутність відкритих поверхонь випаровування - поліпшення умов праці.

Основним недоліком методу є велика кількість технологічних відходів – жертвних, дренажних, вбираючих шарів, герметизуючих плівок. Останнім часом стали застосовуватися багаторазово використовувані еластичні діафрагми, або самотійно, або в комплексі з вентиляційним і розділовим шаром. Ці засоби до деякої міри знижують кількість відходів.

4.1.3 Автоклавне формування

Викладення препрегу може бути здійснене вручну, автоматизованим викладенням стрічки (Automatedtapelaying (ATL)), намотуванням або автоматизованим викладенням волокна (Automatedfiberplacement.(AFP)). Ручне викладення - самий трудомісткий метод, але може бути найбільш економічним, якщо число виробів мале, або конфігурація деталі занадто складна для автоматизації. Автоматизоване викладення стрічок вигідне для плоских або ледь криволінійних поверхонь, наприклад обшивання крила. Намотування - високопродуктивний процес, що використовується, насамперед, для тіл обертання або близьких до них. Автоматизоване викладення волокна - гібридний процес, що володіє деякими з ознак викладення стрічкою й намотування. Це спосіб був розроблений для автоматизованого виготовлення габаритних виробів, які не можуть бути виготовлені жодним із цих методів.

4.2 Вибір метода виготовлення конструкції

Було обрано для виготовлення тришарової панелі та коробчатого профілю – метод вакуумної інжекції. Переваги дивитись в таблиці 4.1

					КР.134.4161.01.ПЗ.04	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		61

Таблиця 4.1 – Переваги вакуумної інжекції

Переваги	Коментарі
Низькі витрати на матрицю й оснащення	Потрібні тільки незначні модифікації існуючих відкритих матриць
Кращі механічні властивості склопластику	У результаті досягається більш висока щільність склопластику з більшим вмістом скла
Більша відтворюваність через меншу залежність від кваліфікації	Доти, поки параметри процесу й армуючого пакета залишаються незмінними
Продукція більших розмірів може бути отримана в закритому процесі	більше ефективна для великих виробів, чим для маленьких
Дуже маленька емісія стиролу	Можливе зниження вартості вентиляції
Зниження відходів матеріалу в порівнянні з напилюванням	Як сполучного, так і й армуючого матеріалу
Можливе зниження тривалості виробничого циклу	Для більш складних виробів, товстостінних пластиків, тришарових конструкцій і виробів великої площі
Більш низька вартість великих простих виробів	

4.3 Послідовність виготовлення конструкції

4.3.1 Послідовність виготовлення тришарової панелі

Схема викладання тришарової для вакуумного просочення показана на рис. 4.4.

Послідовність технологічного процесу:

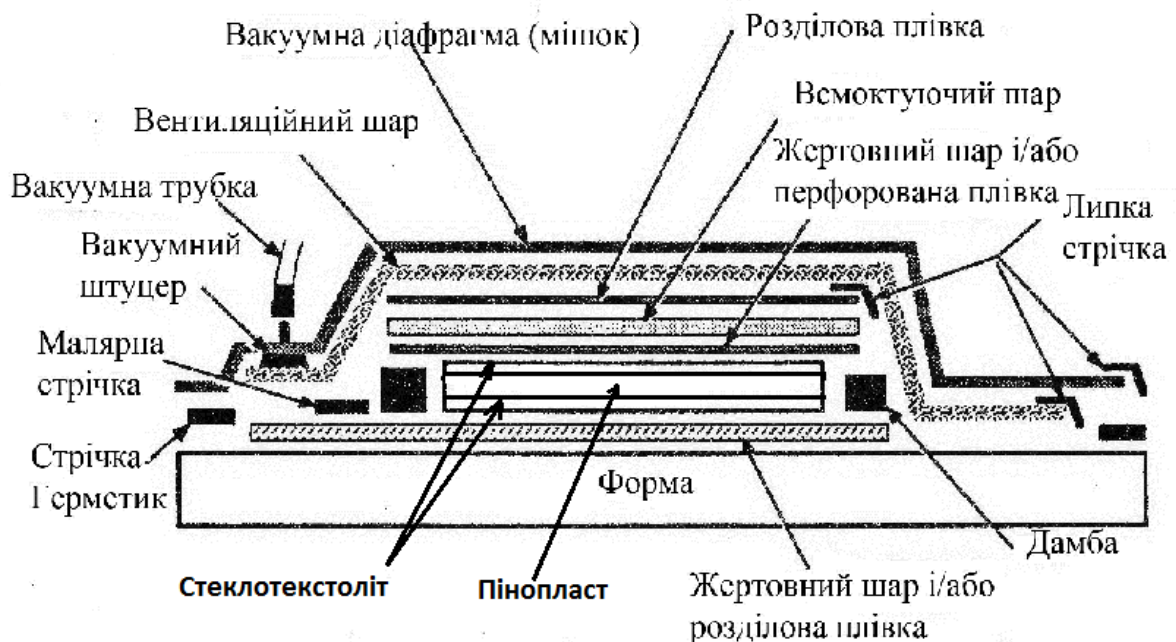
1. Підготовка кондуктора:

- очистка (зачистка);

-заповнення пор;

2) Викладення ламінату. Із системи відкачується повітря і за рахунок різниці тиску в пакет подається смола, змішана з каталізатором - нафтенат кобальта.

- антиадгезив Hi-Low 1000;
- гелькоут CRYSTIC 65 PA;
- - жертвний шар Episize™ Peel Ply;
- ламінат (склотекстоліт на основі біаксіальної тканини) – 5 шарів;
- пінопласт Airex C70.55 S;
- ламінат (склотекстоліт на основі біаксіальної тканини) – 5 шарів;
- перфорований шар FEP – 12.5 – 25/3;
- жертвний шар Episize™ Peel Ply;
- всмоктуючий шар AER – 100;
- розділова стрічка ;
- вентиляційний шар ;



- вакуумний мішок PATS 215.

Рис. 4.4 - Схема виготовлення тришарової панелі.

4.3.2 Послідовність виготовлення коробчастого профілю (див. рис. 4.5)

1) Підготовка кондуктора:

- очистка (зачистка);
- заповнення пор;

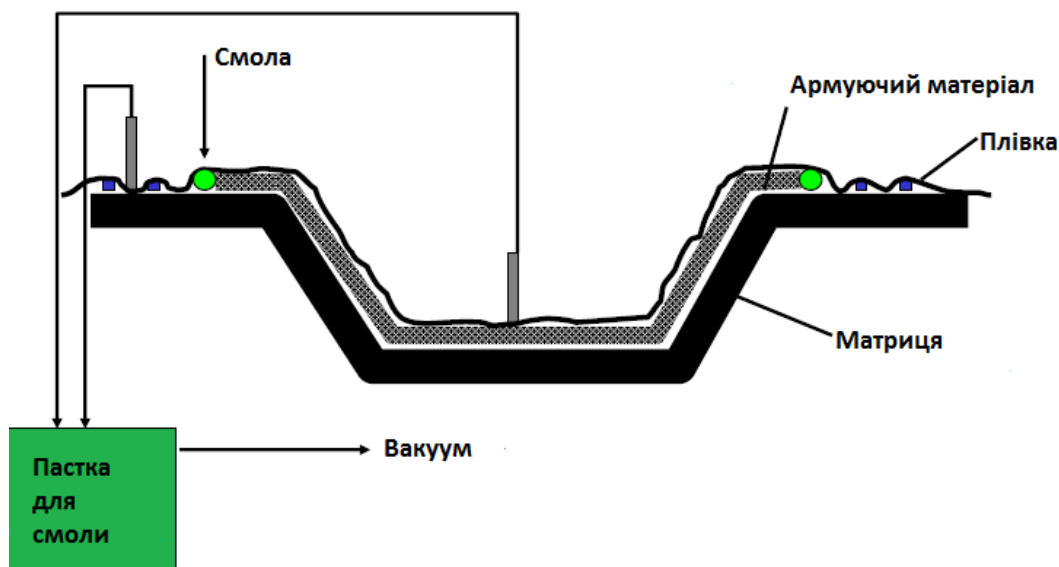


Рис. 4.5 – Схема виготовлення коробчастого профілю.

2) Викладення ламінату. Із системи відкачується повітря і за рахунок різниці тиску в пакет подається смола, змішана з каталізатором - нафтенат кобальта.

- антиадгезив Hi-Low 1000;
- гелькоут CRYSTIC 65 PA;
- жертвний шар peel ply 68;
- ламінат (склотекстоліт на основі біаксіальної тканини) – 5 шарів;
- перфорований шар FEP – 12.5 – 25/3;
- жертвний шар Episize™ Peel Ply;
- всмоктуючий шар AER – 100;
- розділова стрічка ;
- вентиляційний шар ;
- вакуумний мішок PATS 215.

Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата

КР.134.4161.01.ПЗ.04

Лист

64

4.4 Висновки за розділом

Вибрано для виготовлення тришарової панелі та коробчастого профілю метод вакуумної інжекції.

Переваги технології:

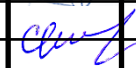
- Низькі витрати на матрицю й оснащення
- Кращі механічні властивості склопластику
- Більша відтворюваність через меншу залежність від кваліфікації
- Продукція більших розмірів може бути отримана в закритому процесі
- Можливе зниження тривалості виробничого циклу

У порівнянні з автоклавним формуванням більш низька вартість великих простих виробів, та набагато якісніша за ручне формування.

					КР.134.4161.01.ПЗ.04	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		65

ВИСНОВКИ

1. Для виготовлення пішохідного мосту обрано тришарову конструкцію, несучі шари якого – склопластик, заповнювач – пінопласт. З наповнювачем – біаксиальна тканина виробництва Арматон марки ВХМ-800 виробництва VECTORFUSION E-BXCFM 1710 та сполучником поліефірною смолою марки Polipol 335. КМ має достатню міцність, модуль пружності, деформації, низьку вартість.
2. Для підвісного мосту вибрано параметри перерізу тришарової конструкції для настилу мосту: товщина несучих шарів зі склопластику - 12 мм, заповнювач – пінопласт має товщину 50 мм.
3. Довжина мосту з розпірними вантами складає 105,4 м. При аварійній ситуації, коли міст наполовину завантажений, прогин буде 21 мм, при повному навантаженні 104 мм, що у обох випадках задовольняє умовам жорсткості.
4. Перевірено міцність тришарової конструкції у вузлі з'єднання секцій мосту на зріз і зминання.
5. Для виготовлення тришарової панелі та коробчастого профілю вибрано метод вакуумної інжекції. Завдяки низьким витратам на матрицю й оснащення, кращим механічним властивостям склопластику.

					КР.134.4161.01.ПЗ.00			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Висновки	Літ.	Арк.	Аркушів
Студент		Дурневич К.В.						
Керівник		Соломонюк Н.С.					66	68
Н. контр.		Захарова І.О.				НУК		
Зав. каф.		Коростильов Л.І						

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Виноградова М., Мардер А. Міст // Мардер А.П., Євреїнов Ю.М., Пламєницька О.А. та ін. Архітектура: короткий словник-довідник. Київ : Будівельник, 1995.- 250 с.
2. Дороги і мости: збірник наукових праць. Київ, 2021. Випуск 23. 259 с.
<http://dorogimosti.org.ua>
3. Будівництво мостів: етапи, типи мостів - <https://virakran.com/budivnytstvo-mostiv-etapy-typy-mostiv/>
4. ДСТУ 2241-93 Матеріали композитні. Склопластики. Терміни та визначення. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=75190
5. Guide Specification for Design of FRP Pedestrian bridges. First Edition 2008.
6. Сучасні пішохідні мости: конструкція, будівництво, архітектура. / Овчинников І.І., Дядченко Г.С., Овчинников І.Г. Вид-во: Інфра-Інженерія, 2020. <https://profbook.com.ua/budivnyctvo/mosty>
7. Allen and T.M. Murray, Design Criterion for Vibration due to Walking, ASCE четвертий квартал, 1993 року
8. Bachmann, *Case Studies of Structures with Man-Induced Vibrations*, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 3, March 1992.
9. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів [Електронний ресурс] : навч. посіб. / І. О. Мікульонок. 2-ге вид., переробл. та доповн.; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 7,21 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с. – Бібліогр.: с. 287–288.5.
<http://www.netcomposites.com/newspic.asp?6075>
10. Бурдун Є.Т., Гейко С.П. Методичні вказівки до курсового проектування з дисципліни «Загальне проектування та виробництва суден із композиційних матеріалів». Миколаїв : НУК, 2009. 72 с.

11. Секція «Мости, конструкції та будівельна механіка» Збірник наукових праць 83-ї міжнародної студентської наукової конференції (12 - 16 квітня 2021 року)/ ХНАДУ. Харків, 2021. – 238 с.
12. Композитні та порошкові матеріали: навч. посіб. / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, М.Д. Мельничук, О.Л. Садова; за заг. ред. П.П. Савчука. Луцьк: Видавець: ФОП Теліцин О.В., 2017. 368 с.
13. Властивості вуглепластиків армованих металізованими волокнами. / Буря О. І., Рула І. В., Кончиць А. А., Морозов О. Ф., Федоренко М. М. Київ, 2018. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/0227bbac-2d0f-4b99-97f5-5fe262772450/content>
14. ДСТУ Б EN 13164:2013 Матеріали будівельні теплоізоляційні. Вироби із екструдованого пінополістиролу (XPS). Технічні умови (EN 13164:2008, IDT). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=56229
15. <http://www.cniga.com.ua/index.files/penoplast.htm>
16. Crystic® Isophthalic Brush Gelcoat 65PA – https://www.scottbader.com/business/composites/crystic-gelcoat-65pa/?sb_analytics_cookies=accept
17. ДБН В.2.3-22:2009 Мости та труби. Основні вимоги проектування. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=25357
18. Шаповал С. В. Конспект лекцій з курсу «Сучасні будівельні матеріали і технології» / С. В. Шаповал, А. А. Баранова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 97 с.
19. Закора О., Каплинський Д., Корнієв М. та ін. Розрахунки і проектування мостів: Навч. посіб. Т. 1. Київ : НТУ, 2007. 337 с.
20. Канати PFEIFER Запчастини до спецтехніки - https://tkinox.com.ua/kanat_stalevyi_dstu_7668-80/p49839
21. Гейко С.П., Бурдун Є.Т. Технологія виготовлення суднових конструкцій із полімерних композиційних матеріалів: підручник. – Миколаїв : НУК, 2015. – 255 с.