

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 ” _____ червня _____ 2025 р.

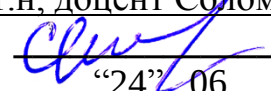
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти бакалавра

на тему: Проектування та технологія виготовлення ресори
автомобіля із композиційного матеріалу

Виконав: студент групи 4161
_____ /Калінін О.О./ **Калінін О.О.**

Керівник роботи:
Доцент кафедри БМ та ККК,
к.т.н., доцент
_____ **Юреско Т.А.**

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

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

«24» 06 2025 року

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

Студенту Калініну Олександр Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Проектування та технологія виготовлення ресори автомобіля із композиційного матеріалу.

Керівник роботи: Юреско Т.А., канд.техн.наук,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора № 401 уч від «26» 05 2025 року

2. Термін подання роботи 15.06.2025.

3. Вихідні дані по роботі: Автомобільна трансверсальна ресора для легкового автомобіля. Розміри ресори: довжина – 1,2 м, з яких 0,1 м – жорстке защемлення в центрі, ширина – 70 мм, висота – 30 мм. Повна маса автомобіля (заправленого з 5 пасажирями та максимальним навантаженням) – 2000 кг.

4. Перелік питань, що належать до розробки

1) Аналіз існуючих конструкцій автомобільних ресор. Огляд матеріалів з яких виконуються конструкція. Вибір матеріалів для виготовлення ресори.

Постановка задач дипломної роботи: спроектувати конструкцію автомобільної ресори з композиційного матеріалу та розробити основні етапи технології виготовлення.

2) Розрахунок експлуатаційних навантажень (статичних та динамічних). Обґрунтування вибору матеріалу. Розробка пакету армуючого

матеріалу з урахуванням вимог міцності і жорсткості та максимального прогину ресори. Розрахунок необхідної товщини автомобільної ресори, з урахуванням вимог міцності і жорсткості.

Провести порівняльну характеристику металевої та композитної ресори за масою та питомою енергією деформації.

3) Технологічна частина. Розробка принципового технологічного процесу по виготовленню автомобільної ресори.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

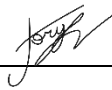
- 1) Загальний вигляд автомобільної ресори (3-Д модель),
- 2) Розрахункова схема визначення експлуатаційних навантажень,
- 3) Розрахункова схема визначення необхідної товщини,
- 4) Технологічні розробки: блок-схема технологічного процесу виготовлення автомобільної ресори,
- 5) Склад композиту. Механічні характеристики складових компонентів,
- 6) Модель армування композиту,
- 7) Порівняльна характеристика композитної та сталеної ресори.

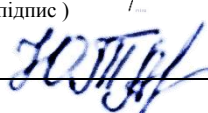
. Консультанти розділів роботи

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

10.02.2025

7. Дата видачі завдання _____

Студент _____  /Калінін О.О./ Калінін О.О.
(підпис) (ПІБ)

Керівник роботи _____  Юреско Т.А.

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота на тему «Проектування та технологія виготовлення ресори автомобіля із композиційного матеріалу» направлена на вдосконалення існуючих конструкцій автомобільних ресор шляхом оптимізації маси ресори та енергії, що поглинається.

В рамках роботи запропонована модель поперечної (трансверсальної) ресори для легкових автомобілів, що виконана з полімерного композиційного матеріалу (склопластик). Визначено оптимальну структуру композиційного матеріалу та висоту перерізу ресори для максимальних можливих експлуатаційних навантажень.

Розроблено технологічний процес виготовлення композитної автомобільної ресори та обрано методи контролю якості.

Ключові слова: поперечна ресора, склопластик, вакуумне формування.

ABSTRACT

The diploma thesis on the topic " Design and technology of a composite car spring" is aimed at improving existing automotive leaf spring designs through optimization of spring mass and absorbed energy.

Within the framework of this work, a model of a transverse leaf spring for passenger cars made from polymer composite material (fiberglass) is proposed. The optimal structure of the composite material and the cross-sectional height of the spring for maximum possible operational loads have been determined.

A technological process for manufacturing the composite automotive leaf spring has been developed and quality control methods have been selected.

Keywords: transverse leaf spring, fiberglass, vacuum forming.

					134.4161.02.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	9
1.1. Види автомобільних ресор	9
1.2. Характеристики обраного автомобіля та ресори	12
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ КОМПОЗИТНОЇ РЕСОРИ	17
2.1. Визначення експлуатаційних навантажень	17
2.2. Обґрунтування вибору матеріалу	20
2.2.1. Вибір армуючого матеріалу	20
2.2.2. Вибір матриці	21
2.3. Модель шаруватого композиту	23
2.3.1. Склад та структура шаруватого композиту	23
2.3.2. Параметри моношарів	26
2.4. Розрахунок дії навантажень	31
2.4.1. Механічні характеристики моделі	31
2.4.2. Параметри вигину ресори	32
2.4.3. Перевірка на міцність	35
2.4.4. Коригування параметрів моделі	37
2.5. Порівняння характеристик композитної та сталевих ресор	40
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ	43
3.1. Обґрунтування технології виготовлення	43
3.2. Технологічний процес виготовлення композитної ресори	46
ВИСНОВКИ	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	51

ВСТУП

Зменшення ваги автомобілів є одним із ключових напрямів розвитку сучасного автомобілебудування. Цей процес продиктований необхідністю підвищення ефективності транспорту, а також зростанням вимог до безпеки, економічності та екологічності автомобілів.

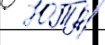
Однією з головних причин, чому зменшення ваги є настільки важливим, є прагнення до підвищення паливної ефективності. Чим легший автомобіль, тим менше енергії потрібно для його пересування. Для машин із двигуном внутрішнього згоряння це означає нижче споживання пального. Менше споживання пального призводить до меншої кількості викидів вуглекислого газу (CO_2), що є одним із головних парникових газів. У світлі глобальної кліматичної кризи ця перевага стає надзвичайно важливою, оскільки транспортний сектор є одним із найбільших джерел викидів.

Ресора автомобільної підвіски є одним із ключових елементів, який має потенціал для зменшення ваги транспортного засобу, адже вона становить від 10 до 20% невіднесеної маси автомобіля (частина маси автомобіля, яка не підтримується пружними елементами підвіски). Зниження цієї маси сприяє покращенню плавності ходу, оскільки полегшені елементи підвіски краще реагують на нерівності дороги, забезпечуючи комфорт і стабільність під час руху.

Завдяки розвитку композитних матеріалів стало можливим зменшити вагу ресор без втрати їх міцності та жорсткості. Композити, зокрема вуглепластики та склопластики, мають вищу здатність зберігати пружну енергію та високе співвідношення міцності до ваги в порівнянні зі сталлю. Це дає змогу покращити динаміку автомобіля, не знижуючи його надійності.

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

					134.4161.02.ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

					134.4161.02.ПЗ.01					
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата						
Студент		Калінін О.О.			Огляд літератури		Літ.	Аркуш	Аркушів	
Керівник		Юреско Т.А.							7	
Консульт.							НУК ім. адмірала Макарова			
Н. Контр.		Захарова І.О.								
Зав. каф.		Коростильов Л.І.								

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Види автомобільних ресор

Автомобільні ресори поділяються на кілька основних типів:

Листові ресори

Складаються з кількох металевих листів (пружин), які накладаються один на одного у вигляді дуги. Вони прості за конструкцією, міцні, здатні витримувати великі навантаження, тому часто застосовуються в вантажних автомобілях, позашляховиках і комерційному транспорті. Існують *параболічні ресори* — це різновид листових, у яких кожен лист має змінну товщину для забезпечення кращої гнучкості й зменшення ваги.

Гвинтові ресори (пружини)

Це спіральні пружини, які працюють на стиск. Вони широко використовуються у легкових автомобілях завдяки своїй компактності, малій вазі та кращому комфорту під час руху. Гвинтові пружини часто поєднуються з амортизаторами та іншими елементами підвіски.

Торсіонні ресори

Є стрижнями, які працюють на кручення. Один кінець торсіона жорстко закріплений, а інший прикріплений до рухомої частини підвіски. При навантаженні стрижень скручується, забезпечуючи пружний ефект. Торсіони використовуються у передній підвісці деяких легкових автомобілів і вітчизняних моделей, а також у підвісці причепів.

Пневматичні ресори (пневмобалони)

Працюють на стисненому повітрі, яке знаходиться в герметичній камері. Вони дозволяють автоматично регулювати висоту кузова, забезпечуючи високий рівень комфорту та адаптацію до зміни навантаження. Пневматичні підвіски переважно встановлюють у дорогих легкових автомобілях, автобусах і важкому вантажному транспорті.

Композитні ресори

Вирізняються високою корозійною стійкістю, довговічністю та низькими витратами на технічне обслуговування. Їх можна виготовляти у складних формах і з мінімальною кількістю деталей, що спрощує конструкцію підвіски. Наприклад, одношарові ресори з композитів можуть замінити багатошарові сталеві аналоги. Крім того, композити мають здатність до накопичення великої кількості енергії деформації, що дозволяє краще поглинати удари й вібрації.

За конструкцією автомобільні ресори бувають повздовжніми та поперечними.

Повздовжні ресори

Розташовуються паралельно до повздовжньої осі автомобіля, тобто від передньої до задньої частини. Це найпоширеніший тип установки листових ресор, особливо у вантажних автомобілях, пікапах, позашляховиках і старіших моделях легкових авто. Повздовжні ресори одночасно виконують функції пружного елемента і направляючого важеля — вони сприймають вертикальні навантаження, а також частково контролюють переміщення моста відносно кузова. Їхня конструкція проста, надійна і добре підходить для умов підвищеного навантаження або бездоріжжя. Часто ресори кріпляться до рами з одного боку жорстко, а з іншого — через шарнір або ковзний механізм, що дозволяє їм змінювати свою довжину під час деформації.

Поперечні ресори

На відміну від повздовжніх, встановлюються перпендикулярно до повздовжньої осі автомобіля, тобто поперек кузова. Вони рідше використовуються в сучасному автотранспорті, але були популярні у деяких ранніх автомобілях, а також залишаються в конструкції окремих спортивних і спеціалізованих моделей (наприклад, деякі моделі Chevrolet Corvette). Поперечна ресора зазвичай встановлюється в передній або задній підвісці й може мати форму арки, яка розпрямляється під навантаженням. Її перевагою є компактність і можливість зниження центру ваги автомобіля, проте вона не забезпечує такої ж ефективності в ізоляції навантажень між лівим і правим колесом, як незалежна підвіска. Також

					134.4161.02.ПЗ.01	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

поперечні ресори можуть створювати додаткові бічні навантаження на кузов і вузли підвіски.

У сучасному автомобілебудуванні поздовжні ресори залишаються популярними через свою міцність і простоту, особливо у вантажному сегменті, тоді як поперечні — це більш нішове рішення, що застосовується там, де важлива вага, низький центр мас або обмежений простір під підлогою.

Ресори виконують функцію поглинання, накопичення та вивільнення енергії, тому при їх проектуванні важливим фактором є здатність матеріалу накопичувати пружну енергію. Матеріали з нижчою густиною та меншим модулем пружності мають вищу питомо-пружну енергоємність, що робить їх ефективнішими для використання в пружних елементах.

Композитні ресори вже застосовуються в серійному виробництві деяких легкових автомобілів (наприклад, у моделях Corvette), а також знаходять широке застосування у вантажному транспорті та автобусах, де зниження ваги має вирішальне значення. Основним недоліком композитних ресор поки що є їх вища вартість у порівнянні зі сталевими аналогами, а також потреба у спеціалізованих технологіях виготовлення та контролю якості. Проте з розвитком технологій виробництва та зростанням вимог до ефективності транспорту, очікується ширше впровадження композитних ресор у різні класи автомобілів.

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

1.2. Характеристики обраного автомобіля та ресори

У відкритому доступі знаходяться численні роботи з проектування прототипів повздовжніх композитних автомобільних ресор з використанням епоксидного склопластику, переважно для легкових автомобілів повною масою від 1200 кг до 1500 кг.

Ця робота спрямована на подальший розвиток теми використання композиційних матеріалів для систем автомобільної підвіски: зменшення кількості ресор через використання поперечної конструкції ресори, збільшення можливої повної ваги автомобіля до 2000 кг та одночасної можливості зберегти міцність за екстремальних умов.

Середні технічні характеристики легкового автомобіля можуть варіюватися залежно від класу (наприклад, малолітражка, седан, хетчбек, кросовер), але для типового середньорозмірного легкового автомобіля (наприклад, седан класу C або D) характерні такі орієнтовні показники:

Довжина – 4,8 м, ширина – 1,9 м, висота – 1,6 м, повна маса (із 5 пасажирями та вантажем) – 2000 кг (дані є усередненими для легковиків типу Volkswagen Golf, Toyota Corolla, Mazda 3, Skoda Octavia, тощо). Дорожній просвіт складає не більше 180 мм, що є визначальним критерієм для вибору максимальних прогинів ресори.

Довжина поперечної ресори для легкового автомобіля з повною масою до 2000 кг і шириною колії приблизно 1,5–1,6 метра становитиме близько 1,2 метра. Це значення визначається виходячи з геометрії підвіски та просторових обмежень. Поперечна ресора розташовується між лівим і правим колесом однієї осі, але не доходить до центрів коліс, оскільки має бути розміщена з урахуванням зазорів для повороту коліс, підвіски, гальмівних механізмів та інших компонентів. Щоб уникнути механічного контакту з обертовими елементами й забезпечити достатній хід ресори під час деформації, її довжина повинна бути менша за повну ширину колії. Значення 1,2 метра становить приблизно 75–80% від ширини колії, що є оптимальним компромісом між гнучкістю, ефективною передачею

навантажень і безпечним розміщенням в підвісці. Така довжина також дозволяє ресорі працювати як пружний елемент із достатнім плечем деформації, що позитивно впливає на плавність ходу та витривалість.

Довжина кріплення ресори до кузова становитиме приблизно 10 см. Це значення обрано на основі вимог до жорсткості, безпеки та просторової ефективності. Кріплення має забезпечити достатню площу контакту для рівномірного розподілу навантаження від ресори на кузов або підрамник. Коротше кріплення може призвести до надмірного навантаження на монтажні отвори або ослаблення з'єднання, тоді як довше кріплення збільшує вагу і займає більше простору, що обмежує компонування елементів підвіски. Крім того, кріплення довжиною 10 см дозволяє встановлювати в нього додаткові демпфуючі елементи, як-от гумові втулки чи прокладки, які зменшують передачу вібрацій на кузов.

Таким чином, довжина ресори $L = 1,2$ м та кріплення 0,1 м є конструкційно обґрунтованими значеннями для легкового автомобіля середнього розміру з урахуванням простору, безпеки, пружних властивостей та надійності. Враховуючи, що кріплення знаходиться точно по центру, отримуємо дві робочі половини ресори довжинами $l = 0,55$ м (див. Рис.1.1).

Висота відхилення кінця ресори напряду впливає на максимальні можливі прогини: якщо величина прогину перевищує запроектовану висоту відхилення виникають ризики зіткнення деталей підвіски з іншими деталями автомобіля, що може призвести до ушкодження та/або руйнування деталей. З урахуванням дорожнього просвіту та запасу, що забезпечить кузов автомобіля перед зіткненням із дорогою, було вибрано висоту відхилення $H = 125$ мм.

До колісної осі ресора кріпиться з обох боків рухомими шарнірними кріпленнями, схематичне зображення яких наведено на Рис.1.1. Такі кріплення ефективно передають навантаження з осі на ресору, при цьому не обмежуючи довжину ресори під час вигину.

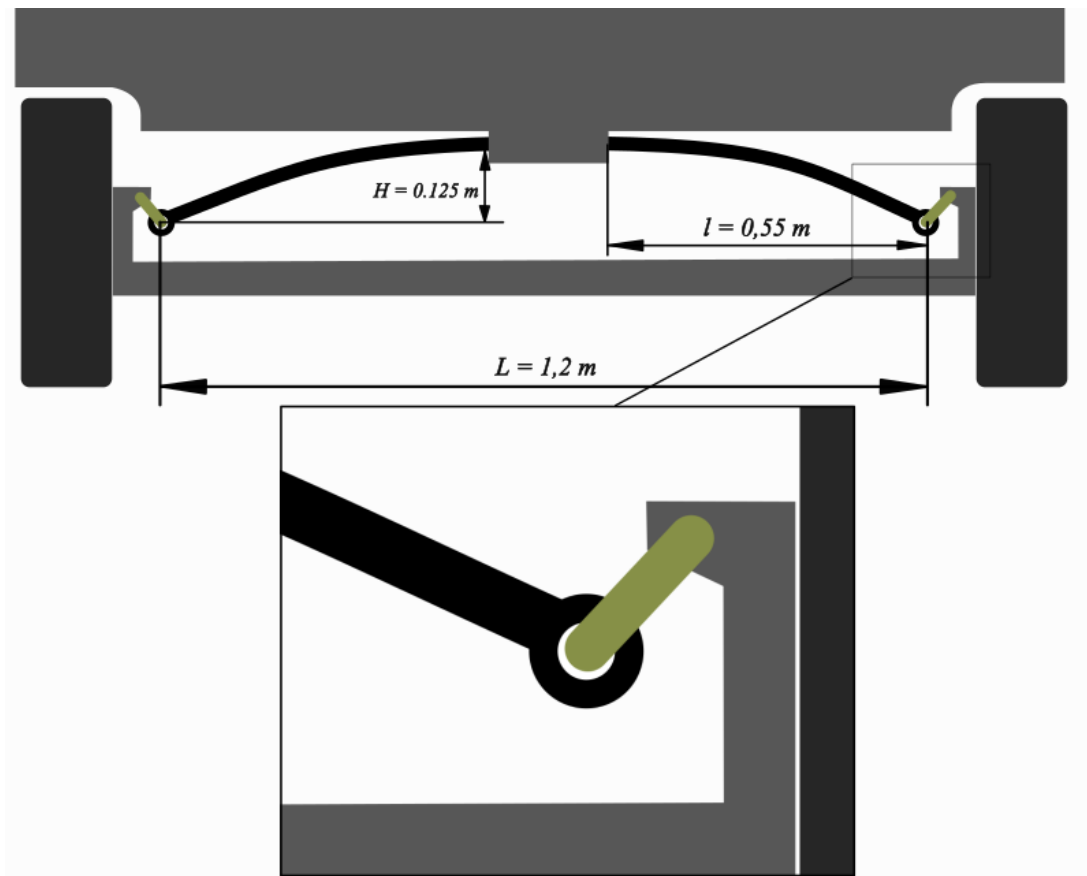


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення поперечної ресори та її кріплень.

Добре відомо, що ресори призначені для поглинання, зберігання, а потім вивільнення енергії. Отже, енергія деформації матеріалу є ключовим фактором при проектуванні ресор. Взаємозв'язок питомої енергії деформації можна виразити як:

$$U = \frac{\sigma^2}{2 \cdot \rho \cdot E} \quad (1.1)$$

де σ – міцність матеріалу на розтяг, ρ – щільність, E – модуль пружності.

Легко помітити, що матеріал із нижчим модулем пружності та меншою густиною матиме більшу питому енергоємність деформації. Запровадження композитних матеріалів зробило можливим зменшення ваги ресори без зниження її вантажопідйомності та жорсткості. Це пояснюється тим, що композитні матеріали мають вищу здатність до накопичення пружної енергії деформації (1.1) та високе співвідношення міцності до ваги порівняно зі сталлю.

Дана робота має за мету також порівняння здатності до накопичення пружної енергії між спроектованою композитною ресорою та відповідною ресорою, що виготовлена зі сталі. Окрім цього розраховано зниження маси ресори при використанні композиційних матеріалів замість сталі.

З урахуванням обраних технічних характеристик конструкції задача даної роботи визначається наступним чином:

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

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

					134.4161.02.ПЗ.02				
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата					
Студент		Калінін О.О.			Проектування композитної ресори		Літ.	Аркуш	Аркушів
Керівник		Юреско Т.А.						15	
Консульт.							НУК ім. адмірала Макарова		
Н. Контр.		Захарова І.О.							
Зав. каф.		Коростильов Л.І.							

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ КОМПОЗИТНОЇ РЕСОРИ

2.1. Визначення експлуатаційних навантажень

Для визначення максимально можливих експлуатаційних навантажень проаналізовано усі можливі види зовнішнього навантаження на трансверсальну ресору:

Статичне навантаження:

- Вага автомобіля, розподілена на передню та задню ресори.

Динамічне навантаження:

- Навантаження, визвані нерівностями доріг,
- Навантаження на одну з ресор під час розгону чи гальмування,
- Навантаження на один з кінців ресори під час виконання повороту,
- Додаткові навантаження через необережне керування.

Усі максимально можливі навантаження є симетричними відносно центру ресори, тому розглядатиметься половина ресори.

Вага автомобіля

Повна вага обраного легкового автомобіля (повністю заправленого та навантаженого) складає 2000 кг. При цьому, коефіцієнт розподілу ваги між ресорами варіюється від автомобіля до автомобіля, але в середньому розподіл виглядає наступним чином: 56% ваги приходить на задню ресору, 44% - на передню. Для розрахунку обрано задню ресору. Статичне навантаження на один кінець задньої ресори складатиме:

$$F_{static} = \frac{0,56 \cdot m \cdot g}{2} = 5493,6H$$

Динамічні навантаження

Додаткові навантаження на ресору, що викликані рухом автомобіля по дорозі, є змінними, що унеможлиблює їхній точний розрахунок. Такі навантаження залежать від багатьох факторів, але лише один з них, який напряду впливає на величину динамічних навантажень, можна точно розрахувати

заздалегідь – величину статичного навантаження. Тому прийнято динамічні навантаження надавати у вигляді добутку статичного навантаження на коефіцієнт максимальних прийнятих навантажень даного виду.

Коефіцієнт динамічних навантажень, що викликані нерівностями доріг складає 1,5-2 для шосейного руху, 2-3 для поганих доріг. Автомобіль, який розглядається в даній роботі, проектується для міських доріг середньої якості, тому прийнято коефіцієнт $K_1 = 2$.

Під час набору швидкості чи гальмування виникає перерозподіл ваги автомобіля з передньої ресори на задню, чи навпаки. Враховуючи потужності автомобілів, що були вибрані для усереднення технічних характеристик, та їхній розподіл маси, обрано коефіцієнт прискорення $K_2 = 0,4$.

Додаткові навантаження, що викликані перерозподілом ваги автомобіля, викликають також повороти та необережне керування. Враховуючи схожу природу виникнення таких навантажень (необережним керуванням можна назвати використання різких маневрів, які можна уявити як послідовність різких поворотів) їхній вплив можна визначити одним коефіцієнтом. Цей коефіцієнт, враховуючи технічні можливості автомобіля, прийнято рівним $K_3 = 0,6$.

Загальна величина динамічних навантажень на один кінець ресори дорівнюватиме:

$$F_{dynamic} = (K_1 + K_2 + K_3) \cdot F_{static} = 3 \cdot F_{static} = 16480,8H$$

Для збільшення точності розрахунку варто додатково врахувати дію бокових сил інерції при поворотах. Максимальна величина такого навантаження розраховується добутком коефіцієнту розподілу ваги між ресорами на величину максимальної доцентрової сили автомобіля при виконанні повороту, що спостерігається при повороті по дузі найменшого радіусу на найбільшій безпечній швидкості. В умовах міської їзди таким поворотом вважається поворот по дузі радіусом 5 м на швидкості 30 км/год. Тоді величина бокового навантаження на кінець задньої ресори буде:

$$F_{side} = 0,56 \cdot \frac{m \cdot v^2}{R} = 15556H$$

Отже, максимальні навантаження на кожний з кінців задньої поперечної ресори дорівнюють:

Статичне навантаження $F_{\text{static}} = 5\,494\text{ Н}$,

Динамічне навантаження $F_{\text{dynamic}} = 16\,480\text{ Н}$,

Бокове навантаження $F_{\text{side}} = 15\,556\text{ Н}$.

Визначенні навантаження прикладені до кінця ресори в напрямках, що відповідають Рис.2.1.

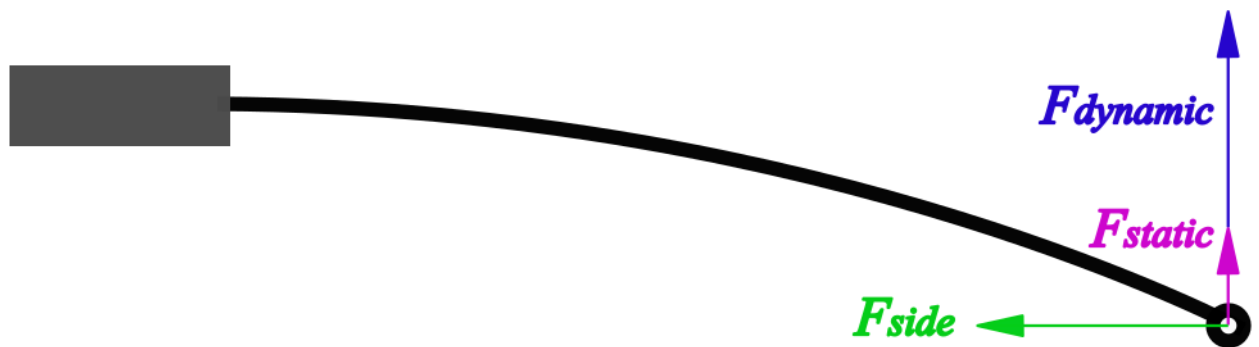


Рисунок 2.1 – Схема напрямків прикладених навантажень.

За природою навантаження робимо висновок, що модель працюватиме на вигин. За граничними умовами (один жорстко защемлений край, один навантажений край) модель розглядатиметься як консольна балка.

2.2. Обґрунтування вибору матеріалу

2.2.1. Вибір армуючого матеріалу

Вибір матеріалів для композиційного матеріалу зазвичай починається з вибору армуючого матеріалу, оскільки саме армуюча фаза (наприклад, волокна) визначає основні механічні властивості композиту, зокрема його міцність і жорсткість. Армуючий матеріал забезпечує здатність композиту витримувати навантаження, тоді як матриця виконує допоміжну роль — фіксує волокна, передає навантаження між ними та захищає від зовнішніх впливів. Таким чином, саме волокна беруть на себе основне механічне навантаження, і тому їх вибирають першими.

Важливим також є напрямок армування — волокна можуть бути односпрямованими або розташованими у кількох напрямках, залежно від умов експлуатації та характеру навантажень. Крім того, вибір типу волокон (вуглецеві, скляні, арамідні тощо) визначає баланс між міцністю, жорсткістю, вагою та вартістю. Наприклад, вуглецеві волокна мають високу жорсткість і малу вагу, тому широко застосовуються в авіації та автомобілебудуванні; скляні волокна дешевші, але мають дещо гірші характеристики; арамідні волокна вирізняються високою ударною міцністю.

Отже, вибір армуючого матеріалу є ключовим етапом, що визначає властивості майбутнього композиційного матеріалу, і лише після цього обирається відповідна матриця для досягнення оптимального поєднання характеристик.

Для даної моделі композитної ресори обрано армування довгими волокнами. Вибір волокна виконується за порівняльною характеристикою, що представлена у Таблиці 2.1. Порівняльна характеристика включає в себе основні механічні властивості декількох видів армуючих волокон, що розглянуті як варіанти матеріалів армування для заданої композитної ресори.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика волокон.

Волокно	Скляне	Вуглецеве	Борне	Арамідне (кевлар)
Міцність на розтяг, МПа	3000-4500	3600-4600	2000-3000	2900-3000
Модуль пружності, ГПа	70-85	190-330	400	70-100
Міцність на зсув, МПа	500-650	600-900	1800	-

Оптимальні критерії для ресори, що виконана з композиційних матеріалів:

- Висока міцність (можливість витримувати значні деформації),
- Низький модуль пружності (забезпечить необхідну «м'якість» ресори, збільшить питому енергію деформації (1.1)),
- Висока ударостійкість (під час експлуатації виникають удароподібні навантаження).

З даних, що наведені в Таблиці 2.1 видно, що для заданих вимог найкраще підходить скляне волокно. Скловолокно має низький модуль пружності, склопластики також мають високу ударостійкість. Використання S-скловолокна замість інших видів скловолокна дасть покращені міцнісні характеристики (за міцністю на розтяг S-скловолокно не поступається вуглецевим волокнам). Додатково, скловолокно є простим у використанні для виготовлення композитів.

Таким чином, для заданої моделі композитної ресори, обрано армуючий матеріал – S-скловолокно.

2.2.2. Вибір матриці

Після вибору армуючого матеріалу обирається матриця, що найкраще працює з обраним видом волокна та відповідає загальним вимогам до конструкції (стійкість до зовнішнього середовища, температурна стійкість, адгезія до армуючого матеріалу тощо).

Розглянуто найпоширеніші варіанти матриць для склопластиків – поліефірна смола, вінілоефірна смола та епоксидна смола. Епоксидні та поліефірні смоли застосовують для виготовлення конструкцій, що зазнають силових навантажень.

Епоксидні смоли

Мають високу міцність (порівняно з іншими смолами), високу адгезією до волокна, високу когезійну міцність, висока стійкість до кислот, лугів, та багатьох інших сполук. Вона є достатньо технологічною, при виготовленні виробів, характеризується якісною поверхнею і стійка до атмосферних впливів.

Вінілоефірні смоли

Вінілоефірним смолам властива еластичність при розтягуванні, виготовлені на їх основі ламінати витримують високі навантаження (циклічні та вібраційні) на етапі проектування. Якщо не поставлено завдання збереження високої міцності при підвищених температурах, або стійкості до хімічних речовин і корозії – немає жодного сенсу платити зайву ціну за використання вінілоефірної смоли. Недоліками вінілоефірної смоли є те, що термін придатності у них часто значно менше чим у звичайних поліефірних смол, системи твердіння складніші у вигляді нафтенату кобальта в парі з речовиною під назвою диметиланілін (або ДМА) - дуже небезпечного, який також являється канцерогеном. Через те, що для вінілєфірної смоли окрім каталізатора можуть потрібно ще два прискорювачі, працювати з ними складніше в плані термінів желатинізації і полімеризації, оскільки вони залежать від пропорцій відразу трьох інгредієнтів.

Поліефірні смоли

Фізико-механічні властивості поліефірних смол дещо кращі за інші види смол: висока міцність та жорсткість, стійкість до хімічного впливу. Проте поліефірні смоли мають ряд суттєвих недоліків: погану адгезію до поверхонь, високу водопроникність, значний вміст токсичних компонентів та велику усадку під час твердіння.

В якості матриці заданої ресори, що виконана з композиційного матеріалу, обрано епоксидну смолу через її екологічність, гарні фізико-механічні властивості, хімічну стійкість та низький рівень усадки.

					134.4161.02.ПЗ.02	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

2.3. Модель шаруватого композиту

2.3.1. Склад та структура шаруватого композиту

Композитна ресора під час експлуатації зазнає деформації вигину, найбільші напруження (стискання/розтягування) спостерігаються в граничних шарах. В середніх шарах композитної моделі переважають дотичні до перерізу напруження. Отже, вимоги до моделі шаруватого композиту наступні:

- Висока міцність на розтягування/стискання,
- Повздовжня жорсткість, що забезпечить оптимальний рівень прогинів,
- Малонавантажені шари композитної ресори можуть мати меншу повздовжню жорсткість задля збільшення питомої енергії деформації,
- Додатково, виходячи з умов експлуатації ресори, необхідно забезпечити поперечну міцність та жорсткість.

Виходячи з визначених вимог до пакету композиційного матеріалу запропоновано модель (Рис.2.2), в якій:

- Зовнішні шари композиту складаються з однонапрямого S-скловолокна або однонапрямної тканини з S-скловолокна (орієнтація волокон – повздовжня, 0°),
- Внутрішні шари композиту складаються з тканого ровінгу, виконаного з S-скловолокна (орієнтація волокон $\pm 45^\circ$).

Така модель композиту сприйматиме найбільше навантаження розтягування/стискання на зовнішніх шарах (однапрямних). Внутрішні шари мають менший модуль пружності, що збільшує питому енергію деформації. Додатково, орієнтація волокон $\pm 45^\circ$ у внутрішніх шарах з тканого ровінгу збільшить загальні поперечні міцність та жорсткість композиту.

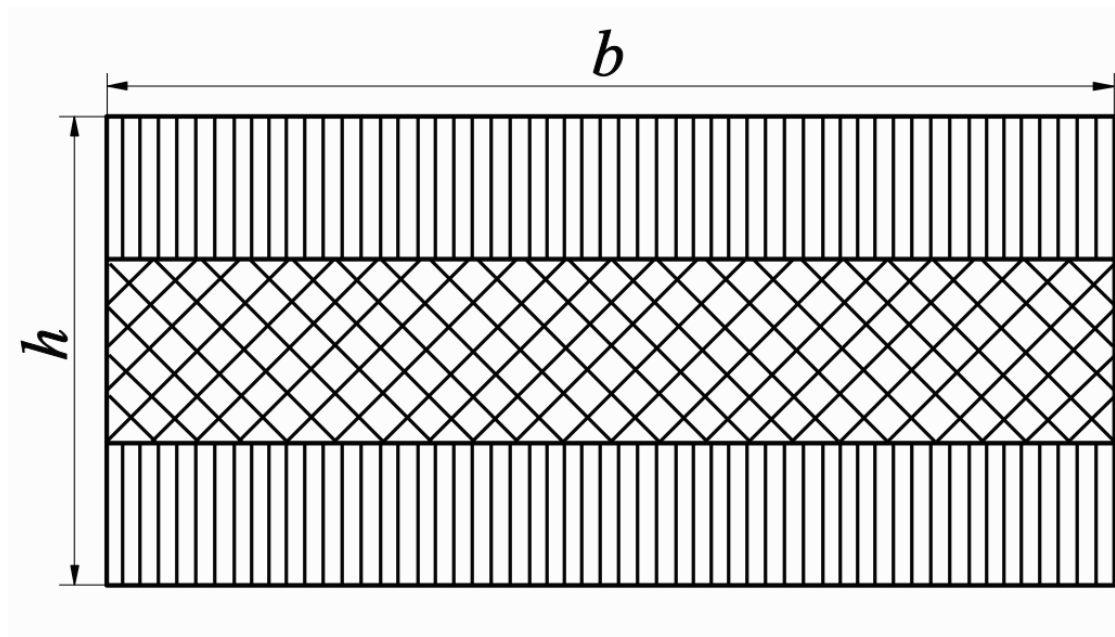


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення моделі шаруватого композиту.

де h та b – відповідно висота та ширина поперечного перерізу ресори.

Для даної моделі автомобільної ресори, що виконана з композиційного матеріалу, обрано матеріали: однонапрямна тканина для зовнішніх шарів, тканий ровінг для внутрішніх шарів та епоксидна смола та затверджувач.

Однонапрямна тканина:

UTEK COMPOSITE S-glass Unidirectional Fabric SWU414

Тканий ровінг:

UTEK COMPOSITE S-glass Woven Roving SWR800

Епоксидна смола та затверджувач:

PRIMSON COMPOSITES Epoxy Resin LP150 (+ затверджувач HP404)

Характеристики обраних матеріалів наведені в Таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Властивості обраних компонентів композиту.

Тканини					
	ТЕХ	Кількість (ниток/см)		Поверхнева щільність (г/м ²)	Товщина, мм
Однонапрямна	660	Осн 6,1	Вуд 1,6	414	0,34
Тканий ровінг	1980	Осн 2	Вуд 2	810	0,75
Смола + затверджувач					
Густина	Твердіння	Температура теплового відхилення		Час застигання	Співвідношення смола/затверджувач
1,16 кг/л	За кімнатної температури	55-120°C		300-360 хв	За вагою: 100:35 За об'ємом: 100:42
Застосування:		ручне нанесення, намотування, RTM, інфузія			

Модель композитної ресори має постійний прямокутний переріз. Середні значення ширини та висоти перерізу для композитних ресор складають близько 70 мм в ширину та 25-30 мм у висоту. Обрано початкові значення ширини b та висоти h перерізу ресори відповідно 70 мм та 30 мм. На основі цих параметрів складено модель шаруватого композиту з використанням вище зазначених матеріалів:

- 25 шарів однонапрямної тканини, орієнтація волокон 0° ,
- 18 шарів тканого ровінгу, орієнтація волокон $\pm 45^\circ$,
- 25 шарів однонапрямної тканини, орієнтація волокон 0° .

Отримано модель композиту, переріз якого має розміри: ширина $b = 70$ мм, висота $h = 30,5$ мм. Висота першого шару з однонапрямної тканини $t_1 - t_0 = 8,5$ мм, висота другого шару з тканого ровінгу $t_2 - t_1 = 13,5$ мм, висота третього шару з однонапрямної тканини $t_3 - t_2 = 8,5$ мм (Рис.2.3).

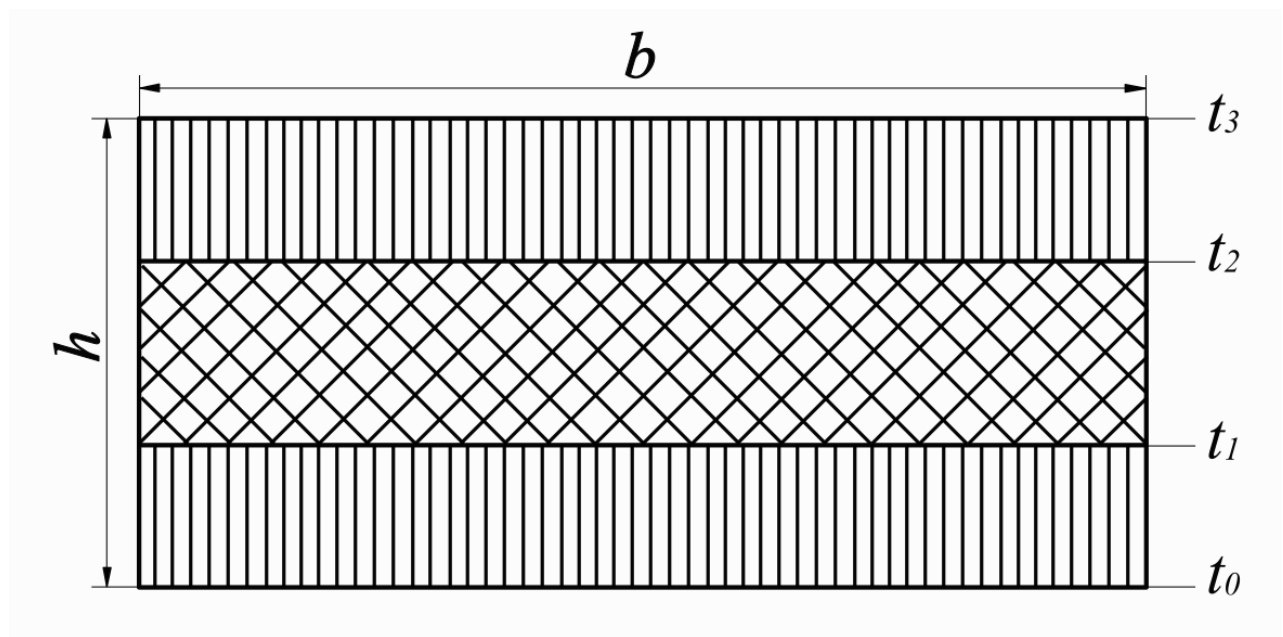


Рисунок 2.3 – Розміри моделі композитної ресори.

2.3.2. Параметри моношарів

Для розрахунку параметрів моношарів (ступені наповнення для обраних тканин, модулі пружності, міцності на розтягування, стискання та зсув вздовж головних вісей) використано властивості обраних матеріалів, надані у Таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Властивості обраних матеріалів

	S-скловолокно	Епоксидна смола
Щільність ρ , кг/м ³	2490	1250
Коеф. темп. розш. α , K ⁻¹	$2,85 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-5}$
Міцність на розтяг σ_b , МПа	4700	90
Міцність на стискання σ_c , МПа	4000	140
Модуль пружності E , ГПа	90	4
Коефіцієнт Пуасона μ	0,22	0,3
Модуль зсуву G , ГПа	35	1,538
Міцність на зсув τ , МПа	650	30

Ступені наповнення композиту армуючим матеріалом для обраних тканин розраховано за формулою (2.1):

$$\psi = \frac{W}{\delta \cdot \rho_{S-glass}} \quad (2.1)$$

Де W – поверхнева щільність тканини, кг/м^2 , δ – товщина тканини, м , $\rho_{S-glass}$ – щільність S-скловолокна.

Виконавши розрахунок отримано наступні значення ступенів наповнення:
Однонапрямна тканина – 48,9%, тканий ровінг – 43,4%.

Модулі повздовжньої пружності E_x та поперечної пружності E_y , модуль зсуву G_{xy} визначено за наступними формулами:

$$E_x = E_{fiber} \cdot \psi + E_{matrix} \cdot (1 - \psi) \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{E_y} = \frac{\psi}{E_{fiber}} + \frac{1 - \psi}{E_{matrix}} + \frac{(\mu_{fiber} \cdot \psi + \mu_{matrix} \cdot (1 - \psi))^2}{E_{fiber} \cdot \psi + E_{matrix} \cdot (1 - \psi)} \quad (2.3)$$

$$G_{xy} = \frac{G_{fiber} \cdot G_{matrix}}{G_{matrix} \cdot \psi + G_{fiber} \cdot (1 - \psi)} \quad (2.4)$$

Для тканого ровінгу з кутом армування $\pm 45^\circ$ також використано формули визначення коефіцієнту Пуасона та модулю повздовжньої пружності з урахуванням куту армування:

$$\mu = \mu_{fiber} \cdot \psi + \mu_{matrix} \cdot (1 - \psi) \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{E_x} = \frac{\cos^4 \varphi}{E_{x0}} + \frac{\sin^4 \varphi}{E_{y0}} + \sin^2 \varphi \cdot \cos^2 \varphi \cdot \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2 \cdot \mu}{E_{x0}} \right) \quad (2.6)$$

Використавши формули (2.2) – (2.4) для однонапрямної тканини та формули (2.2) – (2.6) для тканого ровінгу отримано наступні значення:

Однонапрямна тканина:

$$E_x := E_F \cdot \psi + E_M \cdot (1 - \psi) = 4.606 \cdot 10^{10} \text{ Па}$$

$$E_y := \frac{1}{\frac{\psi}{E_F} + \frac{1-\psi}{E_M} + \frac{(\mu_F \cdot \psi + \mu_M \cdot (1-\psi))^2}{E_F \cdot \psi + E_M \cdot (1-\psi)}} = 7.426 \cdot 10^9 \text{ Па}$$

$$G_{xy} := \frac{G_M \cdot G_F}{G_M \cdot \psi + G_F \cdot (1-\psi)} = 2.888 \cdot 10^9 \text{ Па}$$

Тканый ровінг:

$$E_1 := E_F \cdot \psi + E_M \cdot (1 - \psi) = 4.13 \cdot 10^{10} \text{ Па}$$

$$E_2 := \frac{1}{\frac{\psi}{E_F} + \frac{1-\psi}{E_M} + \frac{(\mu_F \cdot \psi + \mu_M \cdot (1-\psi))^2}{E_F \cdot \psi + E_M \cdot (1-\psi)}} = 6.753 \cdot 10^9 \text{ Па}$$

$$G_{xy} := \frac{G_M \cdot G_F}{G_M \cdot \psi + G_F \cdot (1-\psi)} = 2.628 \cdot 10^9 \text{ Па}$$

$$\mu_{12} := \mu_F \cdot \psi + \mu_M \cdot (1 - \psi) = 0.265$$

$$E_x := \frac{1}{\frac{\cos(\phi)^4}{E_1} + \frac{\sin(\phi)^4}{E_2} + \sin(\phi)^2 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2 \cdot \mu_{12}}{E_1} \right)} = 7.407 \cdot 10^9 \text{ Па}$$

$$E_y := E_2 = 6.753 \cdot 10^9 \text{ Па}$$

Розрахунок міцності композиту на розтягування та стискання в головних напрямках полягає на визначенні місця початку руйнації – в матриці чи у волокнах. Задля цього знайдено відносні деформації руйнування матриці та волокон. Якщо відносні деформації руйнації менші для матриці, ніж для волокон, міцність розраховується на основі максимальних деформацій матриці, в іншому випадку – на основі максимальних деформацій волокон.

Максимальні відносні деформації при розтягуванні (індекс t) та стисканні (індекс c) для обраних матеріалів:

$$\frac{\sigma_{Ft}}{E_F} = 0.052 > \frac{\sigma_{Mt}}{E_F} = 0.001 \qquad \frac{\sigma_{Fc}}{E_F} = 0.044 > \frac{\sigma_{Mc}}{E_F} = 0.002$$

В обох випадках спостерігається руйнація в матриці, тому формули для визначення міцності на розтягування та стискання в головних напрямках:

$$F_1 = \frac{\sigma_{matrix}}{E_{matrix}} \cdot (E_{fiber} \cdot \psi + E_{matrix} \cdot (1 - \psi)) \quad (2.7)$$

$$F_2 = \sigma_{matrix} \cdot E_y \cdot \left(\frac{2\psi}{0,45\pi} \cdot \left(\frac{1}{E_{fiber}} - \frac{1}{E_{matrix}} \right) + \frac{1}{E_{matrix}} \right) \quad (2.8)$$

Для однонапрямної тканини розраховані значення міцності на розтягування та стискання в головних напрямках:

$$F_{1t} := \frac{\sigma_{Mt}}{E_M} \cdot (E_F \cdot \psi + E_M \cdot (1 - \psi)) = 1.036 \cdot 10^9 \quad \text{Па}$$

$$F_{1c} := \frac{\sigma_{Mc}}{E_M} \cdot (E_F \cdot \psi + E_M \cdot (1 - \psi)) = 1.612 \cdot 10^9 \quad \text{Па}$$

$$F_{2t} := \sigma_{Mt} \cdot E_y \cdot \left(\frac{2\psi}{0,45 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{E_F} - \frac{1}{E_M} \right) + \frac{1}{E_M} \right) = 5.663 \cdot 10^7 \quad \text{Па}$$

$$F_{2c} := F_{2t} \cdot \frac{\sigma_{Mc}}{\sigma_{Mt}} = 8.809 \cdot 10^7 \quad \text{Па}$$

Для тканого ровінгу:

$$F_{1t} := \frac{\sigma_{Mt}}{E_M} \cdot (E_F \cdot \psi + E_M \cdot (1 - \psi)) = 9.293 \cdot 10^8 \quad \text{Па}$$

$$F_{1c} := \frac{\sigma_{Mc}}{E_M} \cdot (E_F \cdot \psi + E_M \cdot (1 - \psi)) = 1.446 \cdot 10^9 \quad \text{Па}$$

$$F_{2t} := \sigma_{Mt} \cdot E_y \cdot \left(\frac{2\psi}{0,45 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{E_F} - \frac{1}{E_M} \right) + \frac{1}{E_M} \right) = 6.285 \cdot 10^7 \quad \text{Па}$$

$$F_{2c} := F_{2t} \cdot \frac{\sigma_{Mc}}{\sigma_{Mt}} = 9.777 \cdot 10^7 \quad \text{Па}$$

де F_{1t} – повздовжня міцність на розтягування, F_{1c} – повздовжня міцність на стискання, F_{2t} – поперечна міцність на розтягування, F_{2c} – поперечна міцність на стискання.

Враховуючи кут армування тканого ровінгу, повздовжня та поперечна міцність визначається:

$$F_{xt} := F_{1t} \cdot \cos(\phi)^2 = 4.646 \cdot 10^8 \text{ Па}$$

$$F_{xc} := F_{1c} \cdot \cos(\phi)^2 = 7.228 \cdot 10^8 \text{ Па}$$

$$F_{yt} := F_{1t} \cdot \cos(\phi)^2 = 4.646 \cdot 10^8 \text{ Па}$$

$$F_{yc} := F_{1c} \cdot \cos(\phi)^2 = 7.228 \cdot 10^8 \text{ Па}$$

Визначення зсувної міцності F_{12} відбувається аналогічним способом: максимальні зсувні деформації волокна є меншими за максимальні зсувні деформації матриці, тому границя міцності розраховується відносно волокна.

$$\frac{\tau_M}{G_M} = 0.02 > \frac{\tau_F}{G_F} = 0.019$$

Для однонапрямної тканини:

$$F_{12} := \frac{\tau_F}{G_F} \cdot G_{xy} = 5.364 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

Для тканого ровінгу:

$$F_{12} := \frac{\tau_F}{G_F} \cdot G_{xy} = 5.364 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

2.4. Розрахунок дії навантажень

Половина моделі ресори вважається консольною балкою, що складається з 3 шарів, характеристики яких визначено раніше. Задля полегшення способу розрахунку прийнято, що ресора є прямою та має постійний прямокутний переріз. Розрахунок дії навантажень виконується за формулами теорії згинання балки. Мета розрахунку – визначити параметри дії заданого навантаження на обрану модель автомобільної ресори: отримати залежності (та побудувати епюри) перерізуючих сил, згинальних моментів, кутів повороту та прогинів моделі, визначити запаси міцності в шарах в залежності від виду напружень.

Умови, яким повинна відповідати навантажена модель:

- Максимальні прогини ресори не перевищують висоту відхилення кінця ресори (125 мм),
- Під дією максимального навантаження не спостерігається руйнація матриці та/або волокна.

2.4.1. Механічні характеристики моделі

Першочергово розраховуються інваріанти балки (2.9), за допомогою яких будуть визначені: осьова жорсткість B (2.10), координата нейтральної осі e (2.11), згинальна жорсткість D (2.12) та зсувна жорсткість K (2.13).

$$I_n = \int_0^h b E_X y^n dy = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^k b_i E_X^{(i)} \cdot (t_i^{n+1} - t_{i-1}^{n+1}) \quad (2.9)$$

$$B = I_0 \quad (2.10)$$

$$e = \frac{I_1}{I_0} \quad (2.11)$$

$$D = I_2 - e \cdot I_1 \quad (2.12)$$

$$K = h^2 \cdot \left(\int_0^h \frac{dy}{b \cdot G_{XY}} \right)^{-1} = h^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^k \frac{t_i - t_{i-1}}{b_i \cdot G_{XY}^{(i)}} \right)^{-1} \quad (2.13)$$

Використовуючи формули (2.9) – (2.13) розраховано:

$$I(n) := \frac{1}{n+1} \cdot (b \cdot E_{xUD} \cdot (t_1^{n+1} - t_0^{n+1}) + b \cdot E_{xWR} \cdot (t_2^{n+1} - t_1^{n+1}) + b \cdot E_{xUD} \cdot (t_3^{n+1} - t_2^{n+1}))$$

$$B := I(0) = 6.181 \cdot 10^7 \text{ Па} \cdot \text{М}^2 \quad e := \frac{I(1)}{I(0)} \rightarrow 0.01525 \text{ М}$$

$$D := I(2) - e \cdot I(1) = 7.068 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{М}^4$$

$$K := h^2 \cdot \left(\frac{t_1 - t_0}{b \cdot G_{xyUD}} + \frac{t_2 - t_1}{b \cdot G_{xyWR}} + \frac{t_3 - t_2}{b \cdot G_{xyUD}} \right)^{-1} = 5.907 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{М}^2$$

2.4.2. Параметри вигину ресори

Визначено граничні умови навантаження ресори:

- Лівий кінець ресори жорстко зацмлений – відсутні переміщення, прогини та кути повороту.
- Правий кінець ресори навантажений – в цій точці залежності сил та моментів вздовж балки приймають значення прикладеного навантаження.

$$\begin{aligned} u0 &:= 0 & N. &:= -F_{side} = -1.543 \cdot 10^4 \text{ Н} \\ v0 &:= 0 & Q. &:= F_{static} + F_{dynamic} = 2.198 \cdot 10^4 \text{ Н} \\ \theta0 &:= 0 & M. &:= 0 \end{aligned}$$

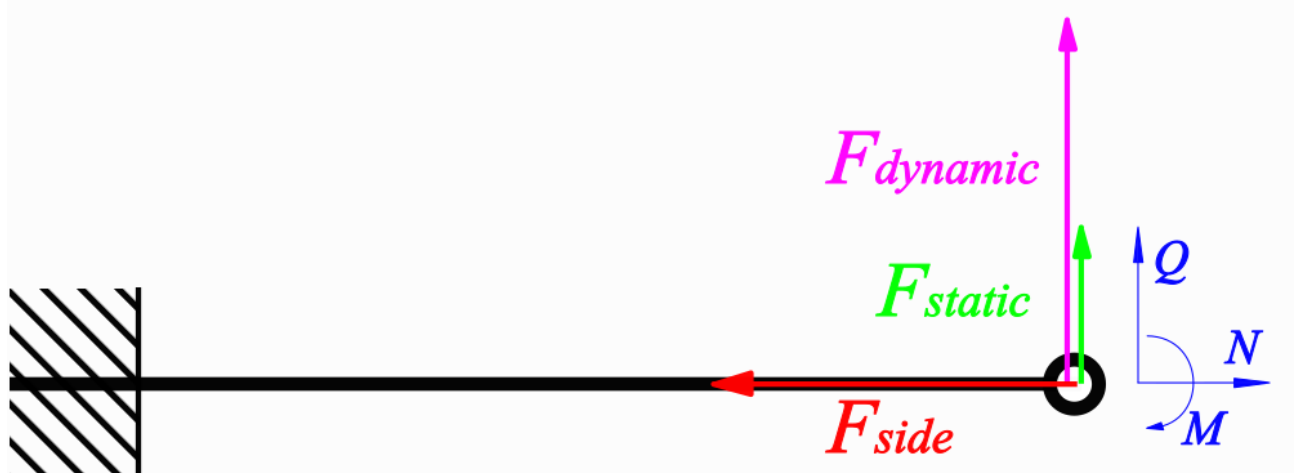


Рисунок 2.4 – Схематичне зображення напрямків навантаження.

Враховуючи, що усе навантаження прикладено на один кінець, можна зробити висновок, що початкові значення сил Q та N дорівнюватимуть кінцевим. Тоді розрахунок дії навантаження матиме вигляд:

$$N_0 := N. \quad N(x) := N_0 = -1.543 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$Q_0 := Q. \quad Q(x) := Q_0 = 2.198 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$M(l) = M_0 + Q_0 \cdot l = M. \quad M_0 := M - Q_0 \cdot l = -1.209 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M(x) := M_0 + Q_0 \cdot x \xrightarrow{\text{float}, 3} 0.22 \cdot 10^5 \cdot x - 0.121 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$u(x) := \frac{N_0}{B} \cdot x \xrightarrow{\text{float}, 3} -0.00025 \cdot x \text{ м}$$

$$\theta(x) := \frac{M_0}{D} \cdot x + \frac{Q_0}{2D} \cdot x^2 \xrightarrow{\text{float}, 3} 1.55 \cdot x^2 - 1.71 \cdot x \text{ рад}$$

$$v(x) := \frac{Q_0 \cdot x}{K} - \left(\frac{M_0}{2D} \cdot x^2 + \frac{Q_0}{6D} \cdot x^3 \right) \xrightarrow{\text{float}, 3} -0.518 \cdot x^3 + 0.855 \cdot x^2 + 0.00372 \cdot x \text{ м}$$

За отриманими залежностями побудовано епюри перерізуючих сил (рис.2.5), згинальних моментів (рис.2.6), кутів повороту (рис.2.7) та прогинів (рис.2.8).

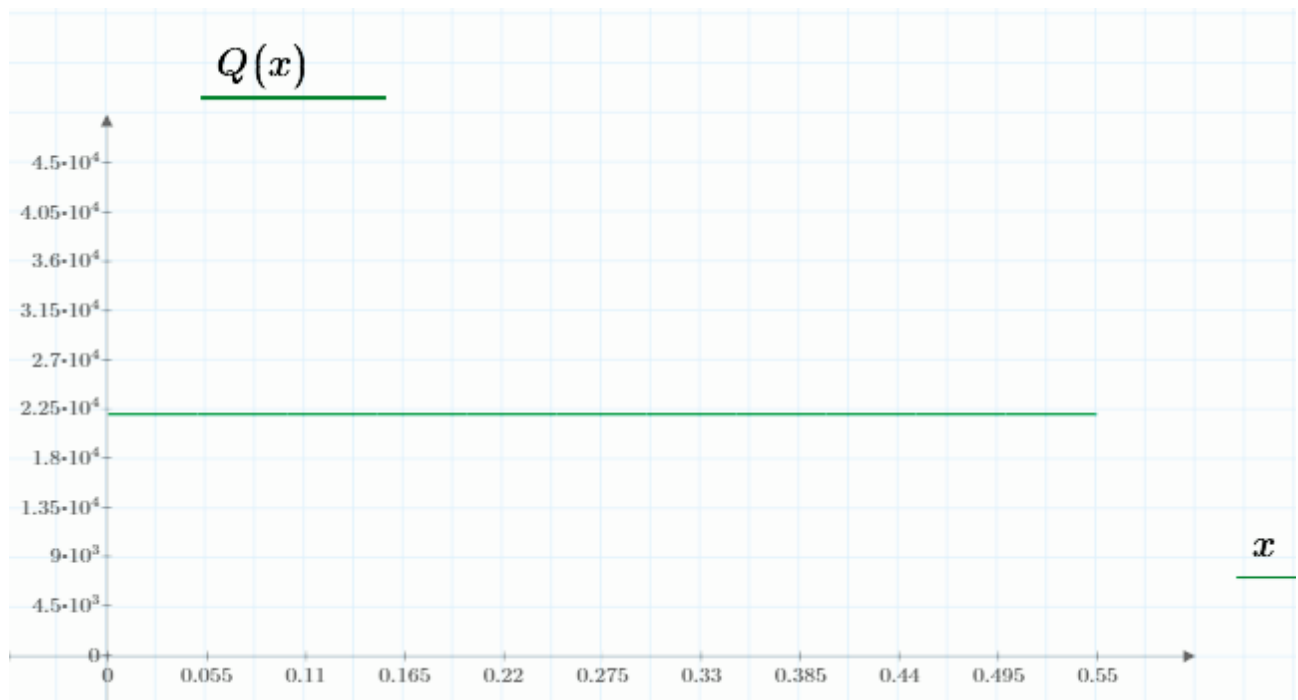


Рисунок 2.5 – Епюра перерізуючих сил.

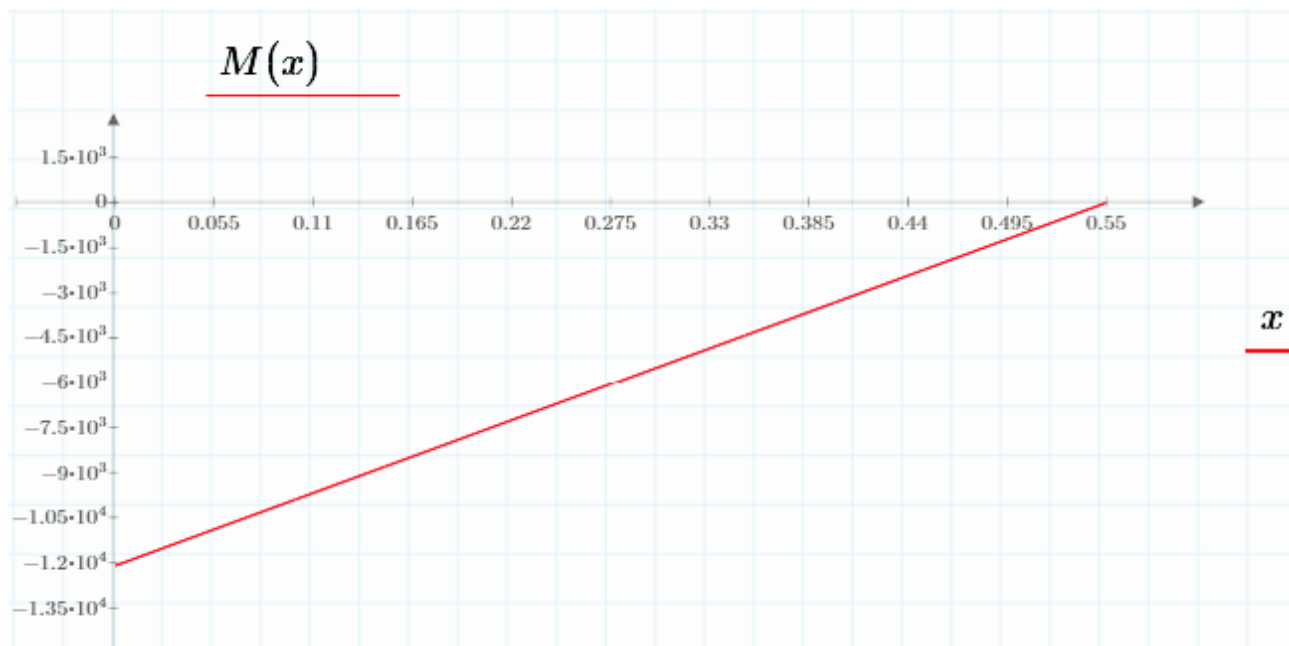


Рисунок 2.6 – Епюра згинальних моментів

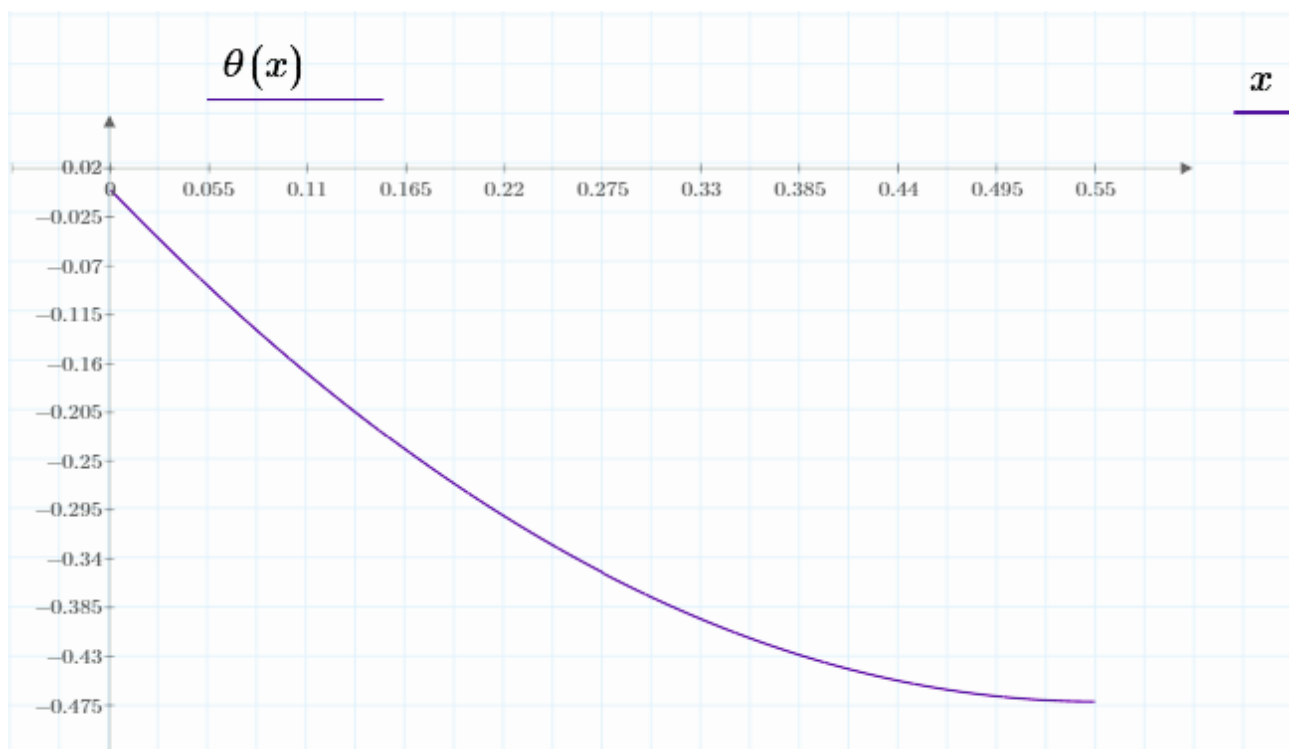


Рисунок 2.7 – Епюра кутів повороту.

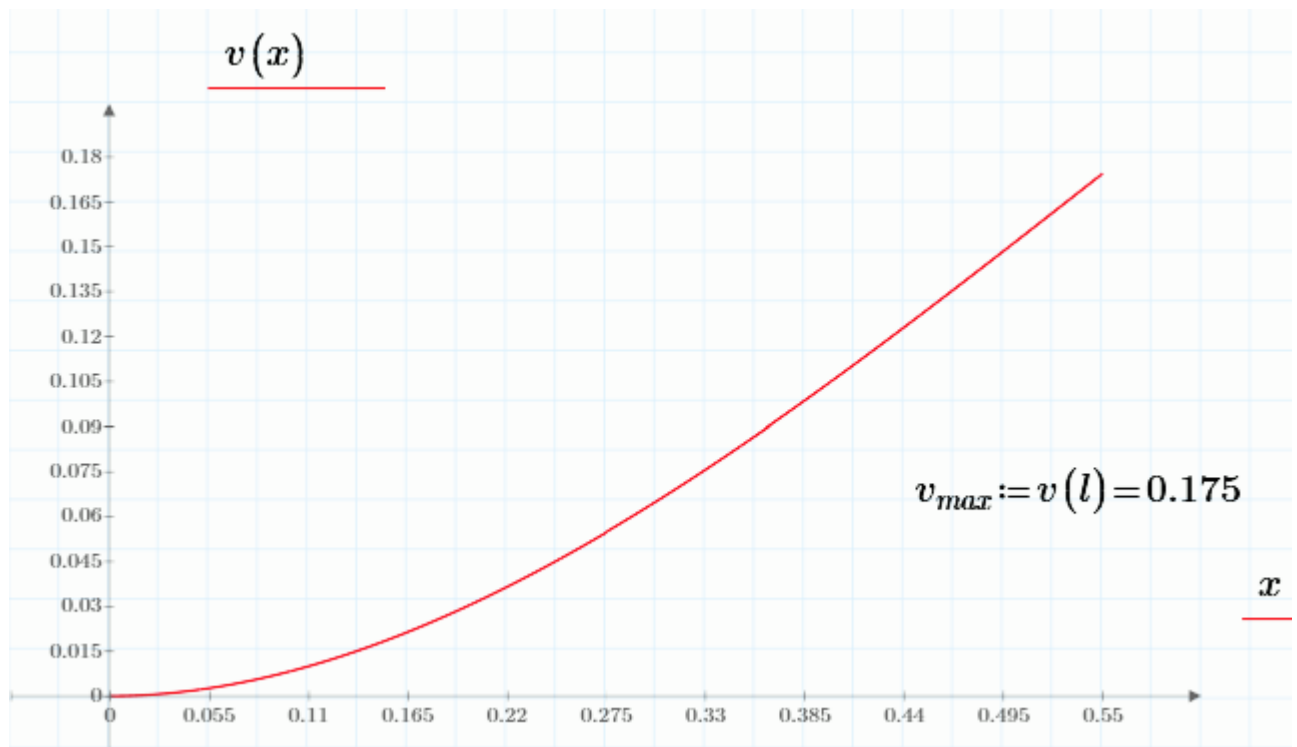


Рисунок 2.8 – Епюра прогинів та максимальний прогин.

2.4.3. Перевірка на міцність

Отримано небезпечний переріз за найбільшими згинальними моментами в т. $x = 0$ (в точці жорсткого защемлення). Розподіли нормальних (головних) напружень σ_x та дотичних напружень τ за висотою в небезпечному перерізі визначаються за формулами (2.14) та (2.15) відповідно:

$$\sigma_x(y) = E_x \cdot \left(\frac{N_0}{B} + \frac{M_{\max}}{D} \cdot (y - e) \right) \quad (2.14)$$

$$\tau(y) = \frac{-Q_0}{b \cdot D} \cdot \int_0^y E_x \cdot b \cdot (y - e) dy \quad (2.15)$$

З урахуванням шаруватості ресори складено по 2 залежності для кожного виду напружень: для однонапрямної тканини (UD) та для тканого ровінгу (WR).

$$\begin{aligned} \sigma_{xWR}(y) &:= E_{xWR} \cdot \left(\frac{N_0}{B} + \frac{M(0)}{D} \cdot (y - e) \right) & \sigma_{xUD}(y) &:= E_{xUD} \cdot \left(\frac{N_0}{B} + \frac{M(0)}{D} \cdot (y - e) \right) \\ \tau_{WR}(y) &:= \frac{-Q_0}{b \cdot D} \cdot \int_0^y E_{xWR} \cdot b \cdot (y - e) dy & \tau_{UD}(y) &:= \frac{-Q_0}{b \cdot D} \cdot \int_0^y E_{xUD} \cdot b \cdot (y - e) dy \end{aligned}$$

Отримані залежності поєднано з урахуванням координат висоти шарів ресори та побудовано загальні епюри нормальних (головних) напружень та дотичних напружень:

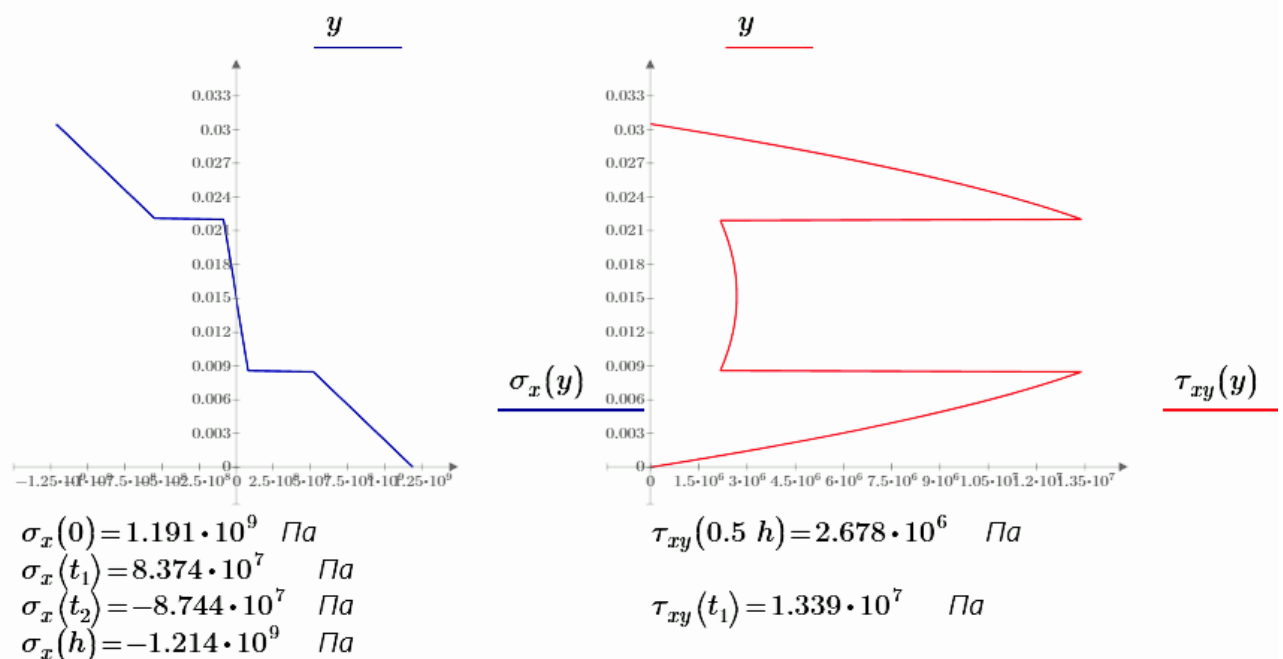


Рисунок 2.9 – Епюри нормальних та дотичних напружень в небезпечному перерізі.

Отримано наступні величини максимальних напружень для кожного шару:

Однонапрямна тканина (UD)

σ_x (розтягування) = 1 191 МПа

σ_x (стискання) = 1 214 МПа

$\tau_{xy} = 13,39$ МПа

Тканий ровінг (WR)

σ_x (розтягування) = 83,74 МПа

σ_x (стискання) = 87,44 МПа

$\tau_{xy} = 2,678$ МПа

Для кожного з отриманих максимальних напружень в кожному шарі розраховано запаси міцності:

$$\frac{\sigma_{xtUD} - |\sigma_x(0)|}{\sigma_{xtUD}} = -0.15$$

$$\frac{\sigma_{xtWR} - |\sigma_x(t_1)|}{\sigma_{xtWR}} = 0.82$$

$$\frac{\tau_{xyUD} - \tau_{xy}(t_1)}{\tau_{xyUD}} = 0.75$$

$$\frac{\sigma_{xcUD} - |\sigma_x(h)|}{\sigma_{xcUD}} = 0.247$$

$$\frac{\sigma_{xcWR} - |\sigma_x(t_2)|}{\sigma_{xcWR}} = 0.879$$

$$\frac{\tau_{xyWR} - \tau_{xy}(0.5 h)}{\tau_{xyWR}} = 0.945$$

Проведені розрахунки показали, що величина максимальних прогинів складає **175 мм**, що перевищує максимальний допустимий прогин (висота відхилення кінця ресори) на 50 мм.

За заданого навантаження в районі жорсткого защемлення спостерігається руйнація матриці у нижніх шарах композиту (деформація розтягування) – **-15%** міцності.

Модель композиту мусить бути допрацьована для забезпечення міцності та допустимих максимальних прогинів.

2.4.4. Коригування параметрів моделі

Для досягнення умов міцності та максимальних прогинів вирішено збільшити кількість шарів однонапрямної тканини з кожного боку ресори: з 25 шарів до 30 шарів. Для отриманої моделі виконано розрахунки, аналогічні до попередніх. Отримані зміни основних параметрів наведено в Таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Механічні властивості моделей армування.

Параметр	Модель 1	Модель 2
Загальна висота перерізу	30,5 мм	33,9 мм
Осьова жорсткість B	$6,18 \cdot 10^7$ Па·м ²	$7,28 \cdot 10^7$ Па·м ²
Згинальна жорсткість D	$7,07 \cdot 10^3$ Па·м ⁴	$9,91 \cdot 10^3$ Па·м ⁴
Зсувна жорсткість K	$5,91 \cdot 10^6$ Па·м ²	$6,59 \cdot 10^6$ Па·м ²
Максимальний прогин	175 мм	125 мм
Запас міцності на розтяг однонапрямної тканини в небезпечному перерізі	-15%	9%

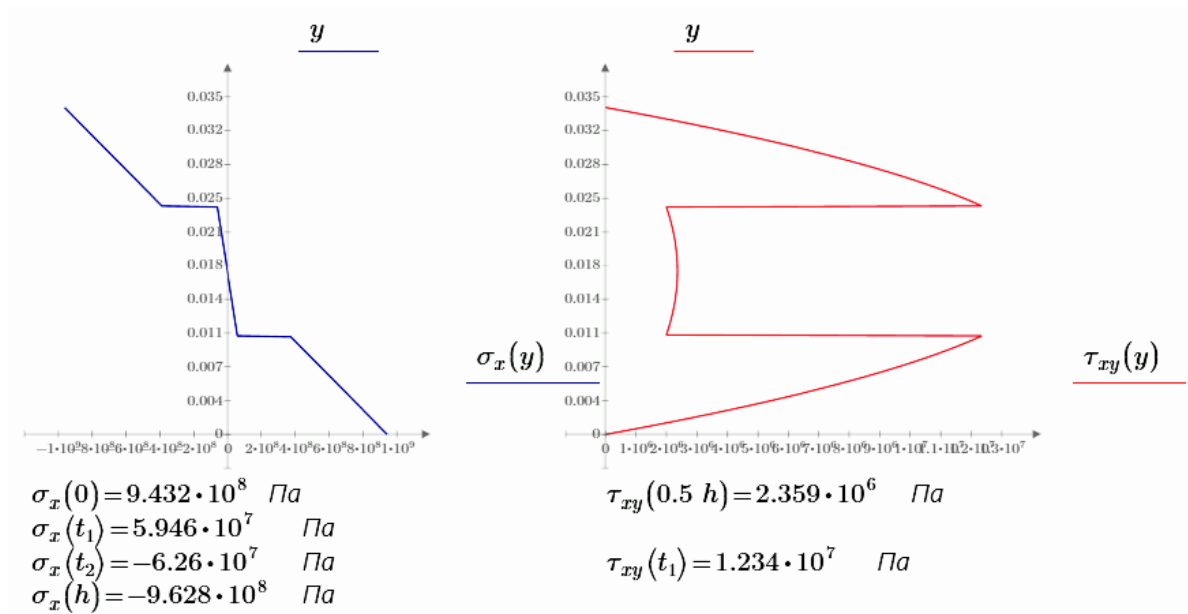


Рисунок 2.10 – Епюри розподілу напружень для моделі 2.

Запаси міцності для кожного виду напружень в кожному шарі:

$\frac{\sigma_{xtUD} - \sigma_x(0) }{\sigma_{xtUD}} = 0.09$	$\frac{\sigma_{xtWR} - \sigma_x(t_1) }{\sigma_{xtWR}} = 0.872$	$\frac{\tau_{xyUD} - \tau_{xy}(t_1)}{\tau_{xyUD}} = 0.77$
$\frac{\sigma_{xcUD} - \sigma_x(h) }{\sigma_{xcUD}} = 0.403$	$\frac{\sigma_{xcWR} - \sigma_x(t_2) }{\sigma_{xcWR}} = 0.913$	$\frac{\tau_{xyWR} - \tau_{xy}(0.5 h)}{\tau_{xyWR}} = 0.952$

Нерідко руйнація композитів починається між шарами – відбувається розшарування. Для перевірки моделі на небезпеку розшарування розраховано міжшарові дотичні напруження (2.16) та розрахований запас міцності за максимальними дотичними напруженнями матриці.

$$\tau_{xy}^{(i,i+1)} = -\frac{Q_0}{2 \cdot b_i \cdot D} \cdot \sum_{j=1}^i E_X^{(j)} \cdot b_j \cdot (t_j - t_{j-1}) \cdot (t_j + t_{j-1} - 2e) \quad (2.16)$$

$$\tau_{xy12} := -\frac{Q_0}{2 \cdot b \cdot D} \cdot (E_{xUD} \cdot b \cdot (t_1 - t_0) \cdot (t_1 + t_0 - 2 \cdot e)) = 1.234 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

$$\frac{\tau_{xyER} - |\tau_{xy12}|}{\tau_{xyER}} = 0.589$$

$$\tau_{xy23} := -\frac{Q_0}{2 \cdot b \cdot D} \cdot (E_{xUD} \cdot b \cdot (t_1 - t_0) \cdot (t_1 + t_0 - 2 \cdot e) + E_{xWR} \cdot b \cdot (t_2 - t_1) \cdot (t_2 + t_1 - 2 \cdot e))$$

$$\tau_{xy23} = 1.234 \cdot 10^7 \text{ Па} \quad \frac{\tau_{xyER} - |\tau_{xy23}|}{\tau_{xyER}} = 0.589$$

Запас міцності матриці на зсув між шарами складає 58,9%, міцність забезпечена.

2.5. Порівняння характеристик композитної та сталевї ресор

Для визначення переваг композитної ресори над відповідною сталюю ресорою, проведемо порівняльну характеристику за масою та питомою енергією деформації.

Маса спроектованої композитної ресори визначається за формулою:

$$m = \sum_{i=1}^k (\rho_{fiber} \cdot \psi_i + \rho_{matrix} \cdot (1 - \psi_i)) \cdot b_i \cdot (t_i - t_{i-1}) \cdot L \quad (2.17)$$

де ρ_{fiber} , ρ_{matrix} – відповідно щільність волокна та матриці, ψ_i – ступінь наповнення i -того шару композиту армуючим матеріалом, $b \cdot (t_i - t_{i-1}) \cdot L = V$ – об'єм i -того шару композитної ресори.

Отримано масу композитної ресори: $m_{KM} = 5,2$ кг.

Маса відповідної сталевї ресори становить $m_{steel} 26$ кг.

Отже, при використанні композиційних матеріалів замість сталі зменшення ваги ресори становить 80%.

Порівняння питомої енергії деформації виконано за формулою (1.1). Найбільші напруження в композитній ресорі спостерігаються в шарах, що армовані однонапрямною тканиною, тому значення питомої енергії деформації цих шарів є значущим.

Отримано значення питомої енергії деформації:

Для композитної ресори: 6 276 Н·м/кг,

Для сталевї ресори: 730 Н·м/кг.

Питома енергія деформації обраного композиційного матеріалу для автомобільної ресори у 8,6 разів перевищує значення для відповідної сталевї ресори, що свідчить про значне збільшення ефективності використання.

Висновки за розділом:

Розроблено модель композитної ресори, яка армована:

- 30 шарів однонапрямної тканини UTEK COMPOSITE SWU414 (орієнтація волокон 0°),
- 18 шарів тканого ровінгу UTEK COMPOSITE SWR800 (орієнтація волокон $\pm 45^\circ$),
- 30 шарів однонапрямної тканини UTEK COMPOSITE SWU414 (орієнтація волокон 0°).

Матриця – епоксидна смола PRIMSON COMPOSITES LP150 (+ HP404).

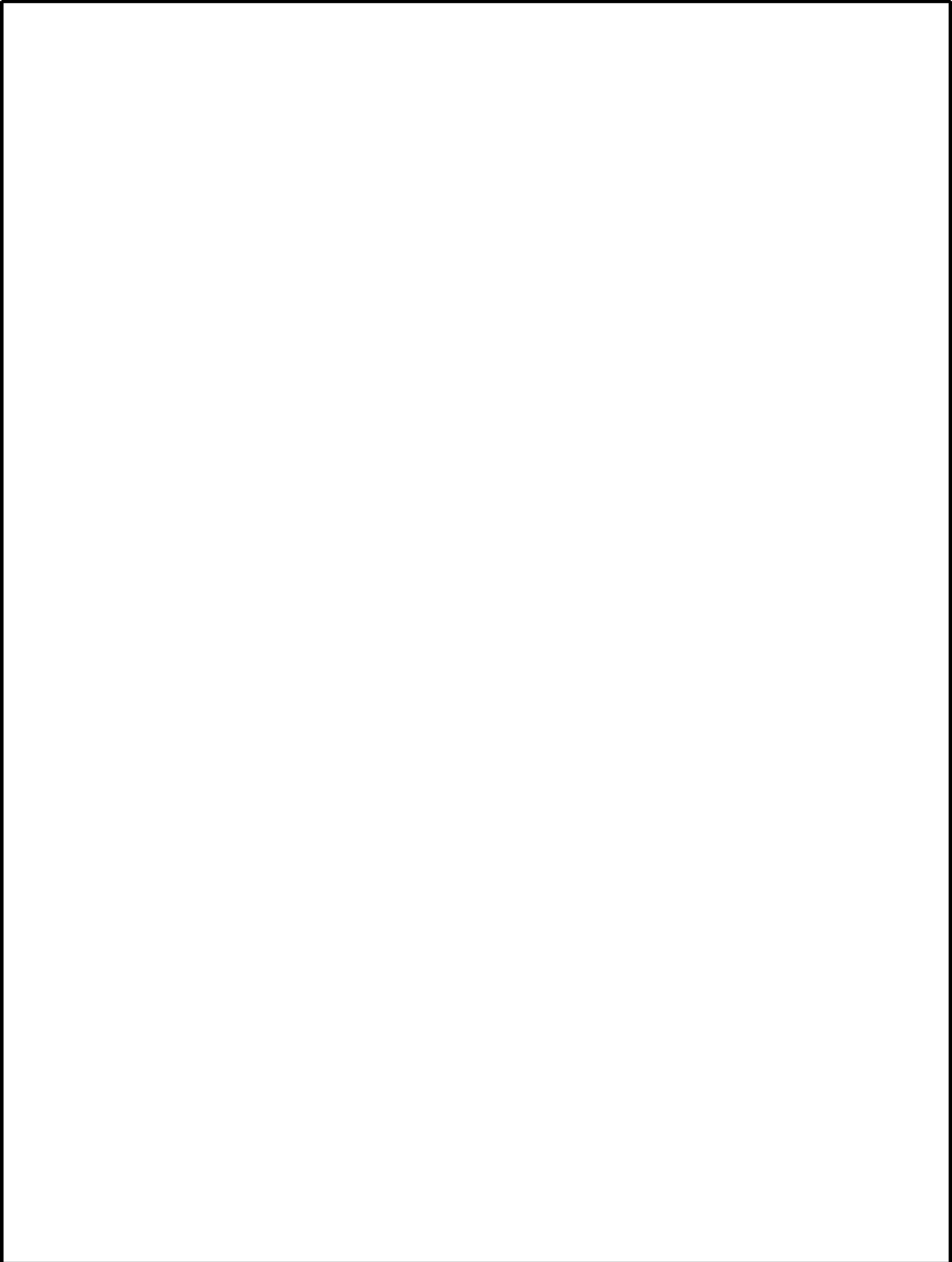
Визначено максимальні експлуатаційні навантаження на задану поперечну ресору для середньорозмірного легкового автомобіля повною масою 2000 кг.

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

- Має максимальний прогин на кінці ресори величиною 125 мм,
- Зберігає міцність в усіх шарах.

У порівнянні зі сталеною ресорою, при аналогічних умовах роботи, розроблена композитна ресора на 80% легша та має у 8,6 разів більшу питому енергію деформації.

					134.4161.02.ПЗ.02	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		



					134.4161.02.ПЗ.03			
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	Технологія виготовлення			
Студент		Калінін О.О.						
Керівник		Юреско Т.А.						
Консульт.								
Н. Контр.		Захарова І.О.						
Зав. каф.		Коростильов Л.І.						
						Літ.	Аркуш	Аркушів
							41	
						НУК ім. адмірала Макарова		

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ

3.1. Обґрунтування технології виготовлення

Під час вибору технології виготовлення автомобільної ресори важливо враховувати, що цей елемент піддається значним експлуатаційним навантаженням, таким як статичні й динамічні навантаження, удари, вібрації та змінне згинальне навантаження, що виникає під час руху транспортного засобу. Тому ресора повинна володіти високими механічними властивостями — достатньою міцністю та жорсткістю.

До виробничих технологій, здатних забезпечити такі характеристики матеріалу, належать методи прес-камерного формування, автоклавного формування та вакуумного формування. Далі розглянемо особливості виготовлення автомобільної ресори зі склопластику з використанням цих технологій.

Автоклавне формування

Автоклавне формування передбачає розміщення підготовленого пакета матеріалу в спеціальну камеру — автоклав, де він піддається ізостатичному стиску завдяки підвищеному тиску, що створюється всередині установки. Тиск при цьому може досягати від 3,5 до 6 МПа. Завдяки можливості створення значного стискаючого зусилля (до 3,5 МПа) та застосуванню вакуумування, цей метод дозволяє отримати композити з високим вмістом армуючих волокон, що забезпечує відмінні фізико-механічні властивості готового виробу.

Однак через складність процесу та високу вартість обладнання, автоклавне формування здебільшого застосовується для виготовлення високотехнологічних деталей, переважно в аерокосмічній промисловості.

Прес-камерне формування

Цей метод передбачає використання в якості пружного пуансона спеціального еластичного елемента — так званої мембрани або балона, виготовленого з гнучкого матеріалу. Після заповнення балона стисненим повітрям, він створює тиск на викладений та просочений полімером шар композитного матеріалу. Тиск у балоні зазвичай становить від 0,3 до 0,8 МПа. Через те, що навантаження прикладається односторонньо й нерівномірно, для цього методу потрібна міцна та жорстка формувальна оснастка, здатна витримувати значні зусилля. Найчастіше прес-камерне формування застосовується для виготовлення замкнених оболонкових конструкцій складної форми.

Вакуумне формування

Ця технологія передбачає ущільнення пакета композиційного матеріалу за рахунок дії атмосферного тиску. Процес відбувається шляхом відкачування повітря з герметичної порожнини, що знаходиться між жорсткою матрицею та еластичною плівкою або мембраною. У результаті цього на матеріал діє ізостатичний тиск з усіх боків, який рівномірно притискає шари до форми.

Метод вакуумного формування є відносно простим у реалізації, не потребує використання громіздкої та високоміцної оснастки, оскільки навантаження розподіляється рівномірно по всій поверхні виробу. Ця особливість дозволяє зменшити витрати на виготовлення прес-форми. Водночас вакуумне формування забезпечує високу якість поверхні та щільне прилягання шарів композиту, що сприяє покращенню механічних характеристик готового виробу.

Завдяки простоті процесу, технологія широко застосовується у виготовленні великогабаритних та тонкостінних композитних деталей у суднобудуванні, транспорті, а також у виробництві склопластикових ресор для автомобілів, де важлива точність геометрії, однорідність структури та економічна доцільність виробництва.

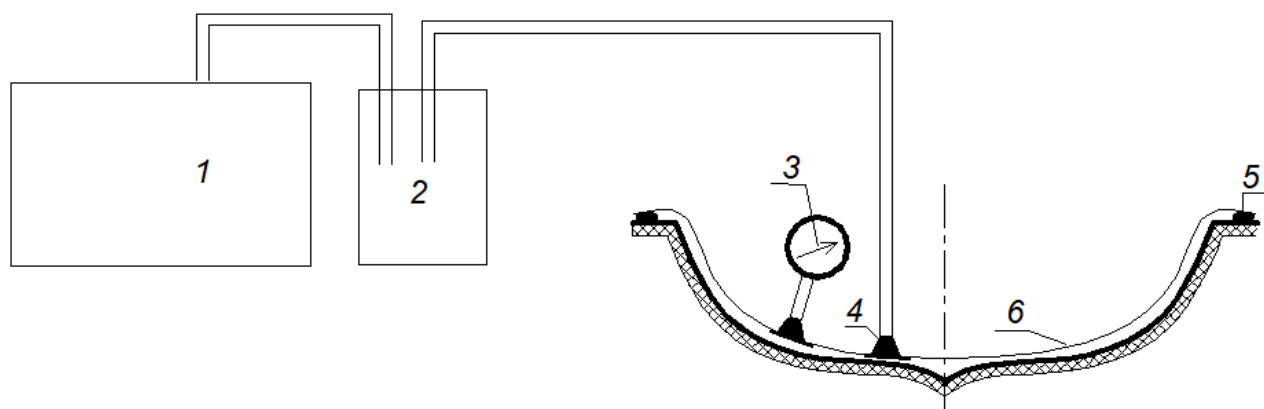


Рисунок 3.1 – Узагальнена схема методу вакуумного формування.

де 1 – вакуумний насос, 2 – пастка для зв'язуючого, 3 – вакуумний манометр, 4 – штуцер під'єднання вакууму, 5 – ущільнення, 6 – еластична діафрагма.

Таким чином, для виготовлення поперечної автомобільної ресори з композиційних матеріалів обрано метод – *вакуумне формування*.

3.2. Технологічний процес виготовлення композитної ресори

Підготовка компонентів

Підготовка армуючого матеріалу

Перед початком роботи зі склотканиною марки UTEK COMPOSITE необхідно провести вхідний контроль на відповідність вимогам нормативно-технічної документації. За дві доби до запланованого використання склотканину у рулонах слід помістити в сушильну шафу, розташовану в зоні підготовки матеріалів, для стабілізації умов зберігання та уникнення накопичення вологи.

Підготовка зв'язуючого компоненту

Усі компоненти зв'язуючого матеріалу, що передбачені для використання, також мають пройти вхідний контроль на відповідність технічним нормативам. За два дні до початку формування необхідно перенести необхідний обсяг зв'язуючих компонентів зі складу до приміщення підготовки, де вони мають стабілізуватися за температурними умовами робочого середовища.

Підготовка технологічної оснастки

Перед початком роботи з формувальною оснасткою необхідно ретельно очистити її поверхню від забруднень, пилу та залишків попередніх технологічних процесів. Поверхню слід зачистити, забезпечуючи її гладкість і готовність до нанесення розділових шарів.

Далі проводиться візуальний огляд для виявлення можливих дефектів, таких як тріщини, сколи, вм'ятини або пошкодження. У разі виявлення таких недоліків оснастку необхідно відремонтувати до приведення у робочий стан.

Також слід перевірити, чи немає на поверхні залишків старого антиадгезійного шару або нашарувань стиролу. Їх можна розпізнати за тьмяними або матовими плямами. Якщо такі ознаки виявлено, необхідно очистити поверхню спеціальним мийним складом або розчином, рекомендованим

виробником, щоб забезпечити належну адгезійну якість при подальшому формуванні.

Викладення пакету композиційного матеріалу

Технологічна послідовність викладення шарів

1. Нанесення антиадгезиву *M20 N SIL* (спрей-антиадгезив) – розпилюється з відстані 10-20 см тонкою рівномірною плівкою, залишити на 10 хв.
2. Нанесення епоксидного гелькоуту *SikaBiresin GC080 (A)* (+ затверджувач *GC11*) пензлем тонким шаром, залишити на 30 хв.
3. Укладання армуючих шарів. Шар за шаром викладається армуючий матеріал у форму за схемою (довжина шару – 1200 мм, ширина – 70 мм):
 - Викласти 30 шарів однонапрямної тканини *UTEK COMPOSITE SWU414* з кутом армування 0° , кожен шар просочується зв'язуючим *PRIMSON COMPOSITES LP150 (+HP404)* за допомогою валика,
 - Викласти 18 шарів тканого ровінгу *UTEK COMPOSITE SWR800* з кутом армування $\pm 45^\circ$, кожен шар просочується зв'язуючим *PRIMSON COMPOSITES LP150 (+HP404)* за допомогою валика,
 - Викласти 30 шарів однонапрямної тканини *UTEK COMPOSITE SWU414* з кутом армування 0° , кожен шар просочується зв'язуючим *PRIMSON COMPOSITES LP150 (+HP404)* за допомогою валика.
4. Герметизація системи
 - Викладення жертвовного шару *Peel ply*,
 - Викладення перфорованої вакуумної плівки *ELA20 P1*,
 - Викладення поглинального шару *Aeratore Poly-Flex* в 2 шари,
 - Всі елементи фіксуються ущільнювальною стрічкою *RC Helper*,
 - Через штуцер під'єднується вакуумна лінія з пасткою для смоли,
 - На поглинальні шари викладається розділювальна плівка *FLD 120 HD P3* та вентиляційні шари *INFUPLEX FASTNET*,

					134.4161.02.ПЗ.03	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		46

- Викладення та ущільнення діафрагми 1VB051-GR.

5. Відкачування повітря

- Із системи поступово відкачується повітря, під час чого необхідно запобігати виникненню натягнутих ділянок плівки,
- Тиск контролюється за допомогою вакуумного манометра (зазвичай -0,9 атм),
- Після відкачування повітря виконується перевірка діафрагми на герметичність за слух або за допомогою детекторів.

6. Полімеризація

- Система витримується за кімнатної температури (20-23°C) протягом 24 годин для повної полімеризації.

7. Демонтаж

- Після повного затвердіння смоли знімається плівка, виріб витягується з форми,
- Виконується механічна обробка виробу: обрізка країв, шліфування за потреби.

8. Контроль якості. Після демонтажу виробу з формувальної оснастки:

- За допомогою штангенциркуля перевірити відповідність висоти перерізу ресори розрахованим значенням. Допустимі відхилення складають 1-2 мм,
- За допомогою механічної рулетки перевіряється відповідність довжини ресори розрахованим значенням. Допустимі відхилення складають 5-7 мм,
- Виконується візуальний контроль виробу на наявність поверхневих дефектів (розтріскування, неоднорідності, пухирці, відшарування).

Висновок:

У даному розділі представлена технологія виготовлення склопластикової автомобільної ресори методом вакуумного формування. Визначено необхідні

					134.4161.02.ПЗ.03	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		47

матеріали для технологічного процесу та процес контролю якості готового виробу.

					134.4161.02.ПЗ.03	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

В даному проекті для бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Проаналізовано існуючі конструкції автомобільних ресор, освітлено їхні переваги та недоліки, області використання. Об'єктом роботи обрано конструкцію поперечної (трансверсальної) ресори довжиною 1,2 м для легкового автомобіля.

Розраховано максимальні експлуатаційні навантаження на один кінець задньої поперечної ресори легкового автомобіля повною масою 2000 кг в умовах міської їзди:

Статичне навантаження – 5,5 кН,

Динамічне навантаження – 16,5 кН,

Бокове (стискаюче) навантаження – 15,6 кН.

Обрано та обґрунтовано матеріал композитної ресори – S-скловолокно та епоксидна матриця. Для обраних матеріалів підібрані марки доступних на ринку пропозицій:

Однонапрямна тканина з S-скловолокна *UTEK COMPOSITE SWU414*,

Тканий ровінг з S-скловолокна *UTEK COMPOSITE SWR800*,

Епоксидна смола *PRIMSON COMPOSITES LP150* (+ затверджувач *HP404*).

Розроблено модель армування склопластикової композитної ресори на основі умов експлуатації та вимог до міцності та жорсткості:

Шар №	Тканина	Кут армування	Товщина шару
1-30	<i>SWU414</i>	0°	0,34 мм
31-48	<i>SWR800</i>	±45°	0,75 мм
49-78	<i>SWU414</i>	0°	0,34 мм

Отримані розміри перерізу ресори: ширина – 70 мм, висота – 33,9 мм.

Для обраної моделі армування визначено масу ресори та питому енергію деформації. За отриманими значеннями виконано порівняльну характеристику композитної ресори та відповідної сталевих ресори. Порівняльна характеристика показала, що використання композиту зменшує масу поперечної ресори на 80%, питома енергія деформації збільшується у 8,6 разів.

Розроблено технологію виготовлення автомобільної ресори методом вакуумного формування. Обрано усі необхідні матеріали, що доступні на сучасному ринку, для розробленого технологічного процесу.

					134.4161.02.ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. G. Lubin. Handbook of composites. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc, 1982. 784 p.
2. R. Pemberton, J. Summerscales, J. Graham-Jones. Marine Composites: Desing and Performance. Duxford: Elsevier, 2019. 530 p.
3. Карпов Я.С. Проекування деталей та агрегатів з композитів: підручник / Харків: Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2010. 768 с.
4. S-Glass Fibre: Mechanical properties. *AZo Materials*. URL: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=769>
5. S Glass Fabric: Specification Lists. *UTEK Composites*. URL: <https://www.utekcomposites.com/Product/S-Glass-Fabric.html>
6. Żywice Epoksydowe (з польської – «Епоксидні смоли»). *Primson Composites*. URL: <https://primson-composites.pl/kategoria-produktu/zywice/zywice-epoksydowe>
7. R.M. Jones. Mechanics of Composite Materials: Second Edition. Virginia: Taylor & Francis, 1999. 540 p.
8. G.S. Shiva Shankar, S. Vijayarangan. Mono Composite Leaf Spring for Light Weight Vehicle – Design, End Joint Analysis and Testing. India: Mechanical Engineering Department, PSG College of Technology, 2005. p. 220-225.
9. A.A. Kassie, R.R. Kumar, A. Rao. Design Of Single Composite Leaf Spring For Light Weight Vehicle. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2014. p. 191-197.
10. S. Nutalapati. Design And Analysis Of Leaf Spring By Using Composite Material For Light Vehicles. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2015. p. 36-59.
11. S. Khamkar, P.A. Narwade, D. Wagh, S. Yede. Design And Transmissibility Testing Of Composite Mono Leaf Spring. International Journal of Innovation in Engineering, Research and Technology, 2015. p. 1-5.

12. Мельник Л.І. Хімія і фізика полімерів: Навч. посібник / Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 161 с.
13. Гейко С.П., Бурдун Є.Т. Технологія виготовлення суднових конструкції із полімерних композиційних матеріалів : підручник / Миколаїв: НУК, 2018. (електронний ресурс).
14. Гейко С.П., Юреско Т.А. Технологія виготовлення виробів із композиційних матеріалів : методичні розробки / Миколаїв: НУК, 2018. (електронний ресурс).
15. Вакуумна технологія. RC Helper. URL: <https://www.rc-helper.com.ua/product-category/vakuumna-tekhnohhiya-vakuumne-formuvannya/>