

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 кафедр
КТН доцент М.М. Бобров

“ ” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня “Бакалавр”

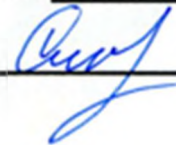
на тему: Проектування та технологія виготовлення
бамперу автомобіля із композиційного матеріалу

Виконав: студент групи 4161

 _____ Леоненко О.О.

Керівник роботи:

к.т.н., доцент Соломонюк Н.С.

 _____

Миколаїв 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Начально науковий інститут(факультет) КННІ

Кафедра БМ та ККК

Спеціальність 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»
(шифр і назва)

Освітня програма «Проектування та виробництво конструкцій із композиційних матеріалів
(шифр і назва)

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

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

« 14 » 06 2026 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття ступеня вищої освіти бакалавра

Студенту Леоненко Олегу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

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

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

Затверджені наказом ректора №_391уч від “09” червня 2026 року

2. Термін подання роботи 15.06.2026

3. Вихідні дані по роботі об’єкт – передній бампер автомобіля з довжиною 1.781 м, шириной 0.3 м,.

4. Перелік питань, що належать до розробки

1) Провести аналіз літературних джерел для вивчення світового досвіду з будівництва передніх бамперів на автомобіль з сучасних матеріалів та ознайомитися з нормативною базою виробництва бамперів.

2) Вибрати компоненти композиційного матеріалу для бамперу та обґрунтувати їх вибір.

3) Розрахувати навантаження на бампер за умов атмосферного тиску, швидкість автомобілю 120 км/год, ударна міцність на швидкості 5 км/год. Врахувати додаткові навантаження на бампер від температур від -20°C до +90°C.

4) Вибрати технологію виготовлення переднього бампера.

5) Зробити висновки стосовно доцільності використання композиційних матеріалів для бамперів.

5. Перелік презентаційних матеріалів 1 – аналіз існуючих конструкцій бамперів, матеріалів для їх виготовлення та умов експлуатації, 2 – схема бамперу легкого автомобіля в загальному вигляді, 3, 4 – Розрахунки навантажень на бампер, 5 – Характеристики матеріалу, з якого виготовлятиметься бампер, 6, 7 – вибір параметрів поперечного перерізу бамперу з композиційного матеріалу, 8, 9 – технологія виготовлення бамперу з композиційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	—		
2	—		
3	Гейко С.П.	20.04.26 Ткач	Ткач / 10.05.25
4	Гейко С.П.	11.05.26 Ткач	Ткач / 21.06.26

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел для вивчення світового досвіду з будівництва передніх бамперів на автомобіль з сучасних матеріалів та ознайомитися з нормативною базою виробництва бамперів.	02.03.2026	

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
2	Вибір компонентів композиційного матеріалу для бамперу та обґрунтування їх вибору	23.03.2026	
3	Розрахунки навантажень на бампер а перевірка міцності	20.04.2026	
4	Розробка технологічного процесу виробництва бамперу з композиційного матеріалу	11.05.2026	
5	Виконання висновків по роботі та її оформлення	10.06.2026	

Студент  Леоненко О.О.
(підпис) (ПІБ)

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

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційну роботу присвячено розробці конструкції та технологічного процесу виготовлення переднього бампера автомобіля з полімерного композиційного матеріалу. Проведено аналіз існуючих конструкцій бамперів та умов їх експлуатації. Обґрунтовано вибір гібридної системи армування, що поєднує вуглецеве волокно (Toray T700S) для забезпечення високої жорсткості та S-скловолокно (CASW220B-90a) для підвищення ударної в'язкості. Як матрицю та захисне покриття обрано епоксидну систему гарячого твердіння Sicomin SR 1710 та епоксидний гелькоут SG 715.

Розраховано зовнішні навантаження (аеродинамічні та ударні) та температурні впливи. За допомогою методу послідовних наближень визначено фізико-механічні характеристики гібридного ламінату та виконано перевірку міцності й жорсткості за критерієм максимальних нормальних напружень. Результати розрахунків підтвердили забезпечення необхідного запасу міцності та жорсткості. При цьому маса розробленого композитного бампера становить 4,11 кг, що майже удвічі менше за металеві аналоги. Розроблено та описано технологічний процес виготовлення виробу методом вакуумної інфузії з розрахунком схеми укладання, витрати матеріалів та режиму пост-полімеризації.

Ключові слова: передній бампер, композиційні матеріали, вуглеволокно, S-скловолокно, епоксидна смола, вакуумна інфузія, міцність, жорсткість, гібридний ламінат.

ABSTRACT

The qualification paper is devoted to the design and manufacturing process development of a front car bumper made of polymer composite material. An analysis of existing bumper designs and their operational conditions was conducted. A hybrid reinforcement system combining carbon fiber (Toray T700S) for high stiffness and S-glass fiber (CASW220B-90a) for enhanced impact toughness was selected and justified. A hot-curing epoxy system (Sicomin SR 1710) and epoxy gelcoat (SG 715) were chosen as the matrix and protective coating.

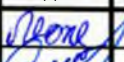
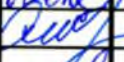
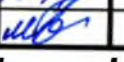
External loads (aerodynamic and low-speed impact) along with thermal stresses were calculated. The physical and mechanical properties of the hybrid laminate were determined using the successive approximation method, and strength and stiffness checks were performed based on the maximum normal stress criterion. Calculation results confirmed that the required margins of safety and stiffness were achieved. The mass of the designed composite bumper is 4.11 kg, which is almost twice as light as standard metal counterparts. The manufacturing technology using the vacuum infusion process was developed and described, including layup schematics, material consumption calculations, and post-curing schedules.

Keywords: front bumper, composite materials, carbon fiber, S-glass fiber, epoxy resin, vacuum infusion, strength, stiffness, hybrid laminate.

					КР.134.4161.05.ПЗ	Лист
						5
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	9
1.1 Функціональне призначення бампера.....	9
1.2 Аналіз прототипів переднього бампера автомобілів	10
1.3 Постановка задачі.....	13
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЕРЕДНЬОГО БАМПЕРА.....	14
2.1 Армуючі матеріали.....	15
2.2 Вибір складу матеріалу(полімерної матриці).....	18
2.3 Вибір декоративного захисного покриття.....	21
2.3 Висновок.....	21
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК НАВАНТАЖЕНЬ ТА МІЦНОСТІ КОМПОЗИТНОГО БАМПЕРА.....	23
3.1 Розрахунок зовнішніх навантажень на бампер	24
3.2 Фізико-механічні характеристики	26
3.3 Фізико-механічні характеристики	36
3.4 Висновок за розділом.....	46
РОЗДІЛ 4 ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА БАМПЕРА.....	48
4.1 Данні матеріалів	49
4.2 Технологія виробництва.....	55
4.3 Висновки за розділом.....	59
ВИСНОВКИ.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	62

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Студент		Леоненко О.О.		
Керівник		Соломонюк Н.С		
				
Н. контр.		Захарова І.О.		
Зав. каф.		Бобров М.М.		
П. контр.		Захарова І.О.		
Зав. каф.		Коростильов ЛІ		

134.4161.05.ПЗ

Зміст

Літ.	Арк.	Аркушів
	6	

НУК

ВСТУП

У сучасному автомобілебудуванні концепція проектування зовнішніх елементів транспортного засобу зазнала фундаментальних змін. Як відомо, передній бампер автомобіля виконує не лише функцію захисту та поглинання ударів при зіткненні на невеликій швидкості. Він також відіграє важливу роль в аеродинаміці, охолодженні та формуванні візуального стилю автомобіля.

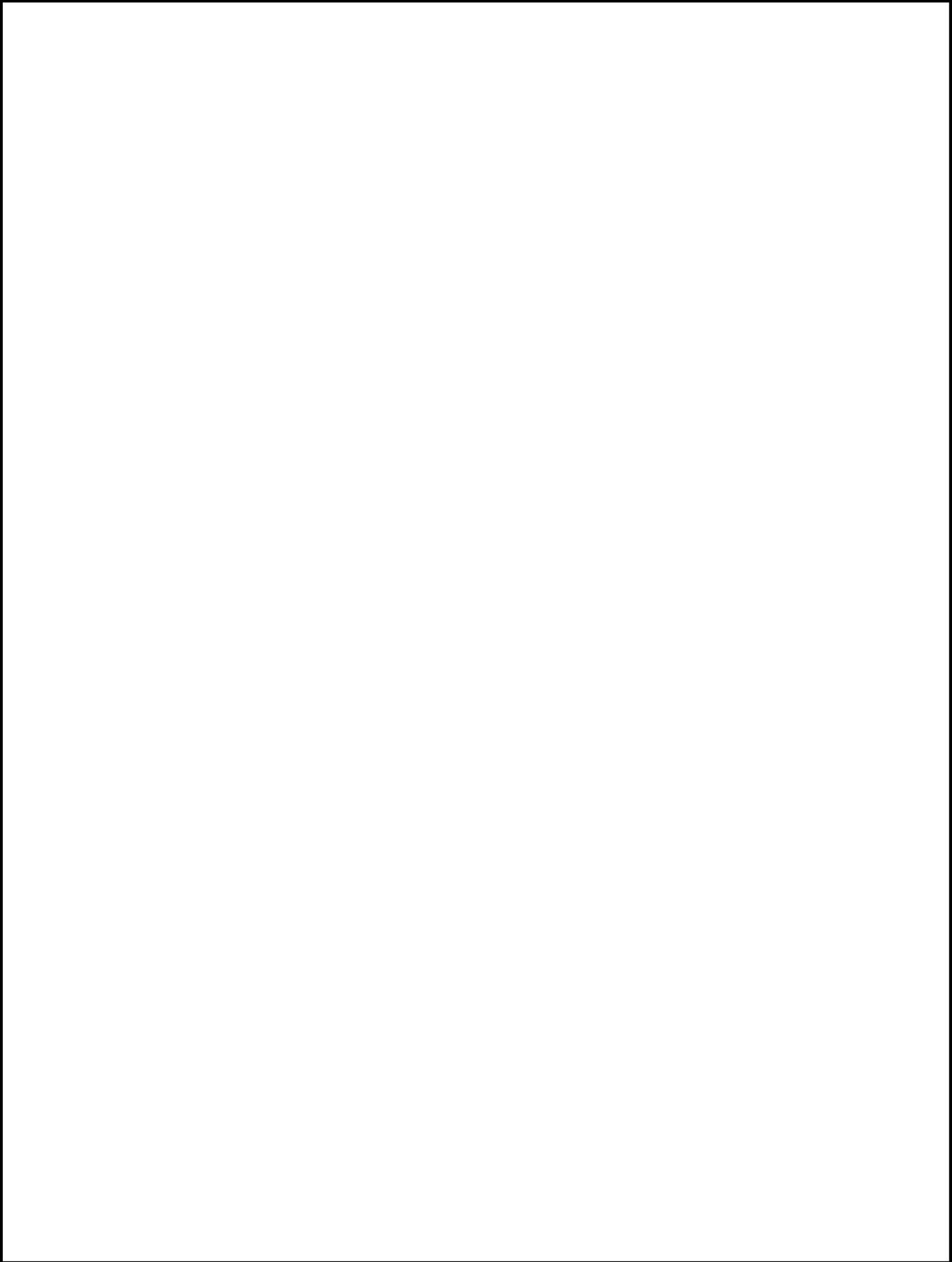
Саме тому сучасне автомобілебудування вимагає застосування інженерних рішень, які дозволяють зменшити вагу, покращити аеродинамічні властивості та підвищити жорсткість конструкції. Впровадження суворих екологічних стандартів та необхідність збільшення запасу ходу як традиційних, так і електричних транспортних засобів змушують виробників шукати альтернативу класичним пластикам. Наразі в автомобілях преміум класу передній бампер виготовляють із карбону або інших композитних матеріалів. Ці матеріали дозволяють досягти оптимального балансу між міцністю конструкції та її масою, забезпечуючи при цьому високий рівень поглинання кінетичної енергії в момент деформації.

Актуальність даного дослідження зумовлена постійною потребою у модернізації наявних кузовних елементів задля досягнення кращих показників пасивної безпеки та паливної ефективності.

Основною **метою** роботи є розгляд та вдосконалення однієї з моделей бамперів.

Для досягнення поставленої мети передбачається вирішення завдань з оптимізації геометричних параметрів виробу, аналізу розподілу повітряних потоків та обґрунтування вибору новітніх конструкційних матеріалів.

					134.4161.05.ПЗ.00	Лист
						7
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		



					134.4161.05.ПЗ									
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Студент		Леоненко О.О.			Розділ 1				Літ.		Арк.	Аркушів		
Керівник		Соломонюк Н.С									8	6		
									НУК					
Н. контр.		Захарова І.О.												
Зав. каф.		Коростильов ЛП												

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Функціональне призначення бампера

Передній бампер сучасного автомобіля - це комплексний захисний елемент кузова, який виконує роль енергопоглинаючого пристрою. У сучасному машинобудуванні він трансформувався з простої металевої балки на складну інженерну систему.

Основні функції переднього бампера:

- 1) Амортизація ударів-поглинання кінетичної енергії під час фронтального зіткнення на малих швидкостях (5 – 8 км/год) для захисту силового каркасу.
- 2) Безпека пішоходів-зниження травм пішоходів у разі деформації та гладких форм бампера.
- 3) Аеродинаміка-перенаправлення лобових потоків задля зменшення лобового супротиву автомобіля.
- 4) Охолодження-перенаправлення лобових потоків задля охолодження двигуна, радіатора та тормозних колодок [1, 13].

1.1.2 Експлуатаційні навантаження та умови роботи

У процесі експлуатації передній бампер постійно зазнає впливу комплексу різnorodних факторів. Вони поділяються на такі ключові фактори:

- 1) Механічні (ударні) навантаження [1;3]

Динамічні удари малої інтенсивності: Зіткнення під час паркування, удари від дорожнього гравію, щебню та шматків льоду.

Статичні деформації: наїзди на бордюри, упор у снігові замети під час руху на низьких швидкостях.

Вібрація: під час руху на кузов автомобіля передається вібрація від двигуна або дорожнього покриття, а бампер кріпиться до кузова автомобіля[3]

Хоча опори двигуна і зроблені для того щоб поглинати вібрації також як підвіска авто , але вони не можуть поглинати вібрацію до нуля.

2) Аеродинамічні навантаження [12]

Тиск зустрічного повітряного потоку: На високих швидкостях бампер витримує постійний згинальний тиск. Деталь не повинна вібрувати чи деформуватися від дії повітря.

3) Кліматичні та температурні фактори [1, 13]

Циклічні перепади температур: Робота в діапазоні від -40°C (взимку) до +80 °C (нагрів від сонця та радіатора двигуна). Матеріал має зберігати пластичність на морозі та не втрачати форму в спеку.

Ультрафіолетове випромінювання: Сонячне світло руйнує структуру незахищених полімерів, викликаючи їхню крихкість та колірну деградацію.

4) Хімічний вплив [13, 14]

Контакт з агресивними середовищами: дорожні реагенти, сіль, нафтопродукти (бензин, моторні оливи), компоненти склоомивальних рідин та автошампуні.

1.2 Аналіз прототипів переднього бампера автомобілів

Задля покращення переднього бампера потрібно розглянути аналоги цих бамперів для різних моделей авто[6].

1.2.1 Ferrari 488 Pista

Спортивний автомобіль преміум сегменту

Передній бампер Ferrari 488 Pista спортивний автомобіль преміум сегменту[12] (рис.1.1)

Матеріал: карбон ,у комплектації з пакетом Carbon Fiber.

Призначення: зниження маси та покращення жорсткості та аеродинаміки.

Форма: великі повітрозабірники, нижній сплітер, аеродинамічні канали.

Технологія: автоклавне формування.

Недоліки: велика ціна, мала ударна міцність.

					134.4161.05.ПЗ.01	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		10

1.2.2. Toyota Corolla

Передній бампер Toyota Corolla [6] (рис 1.2) сімейне авто середнього класу

Матеріал: Оболонка- PP + EPDM (модифікований поліпропілен)

Поглинач- EPP (спінений поліпропілен)

Підсилювач-сталева балка

Призначення: Захист кузовних елементів при низькошвидкісному ударі (5–8 км/ч). Висока гнучкість при невеликих температурах та мала маса

Недоліки: Велика гнучкість та мала ударна міцність та жорсткість. Рисунок



Рисунок 1.1 Бампер Ferrari 488 Pista



Рисунок 1.2 Передній бампер Toyota Corolla

1.2.3 Ford Focus ST

Передній бампер Ford Focus ST[13] (Рис 1.3) сімейне авто середнього класу

Матеріал: скловолокно с полімерною матрицею (GFPP – Glass Fiber Polypropylene).

Призначення: серійне виробництво, гнучкість та ударостійкість.

Форма: інтегровані повітрозабірники, стиль “hot hatch”.

Технологія: лиття під тиском.

Переваги: низька вартість, висока ударостійкість, масове виробництво.

Недоліки: мала жорсткість .

1.2.4 BMW M4 G82

Передній бампер М4 G82[12] (Рис 1.4) спортивне авто преміум класу.

Матеріал: армований пластик + алюмінієві вставки.

Конструкція: великі вертикальні решітки повітрозабору, структурні підсилення.

Призначення: баланс між вагою та жорсткістю, агресивний стиль.

Технологія: інжекційне лиття армованих полімерів.

Недоліки: Велика вага, малий захист кузовних елементів при ударі через алюмінієві вставки.



Рисунок 1.3 Передній бампер Ford Focus ST Рисунок



Рисунок 1.4 Передній бампер М4 G82

1.2.4 Mitsubishi Pajero

Передній бампер Mitsubishi [6](Рис1.5) позашляховик дешевого сегменту

Матеріал:ABS-пластик, підсилений металевими балками.

Конструкція:форма бампера скошена знизу щоб забезпечити великий кут в'їзду.

Недоліки: Бампер дуже крихкий тому власники міняють цей бампер на металевий(лист металу 3 - 4 мм), але такий бампер не поглинає енергію та дуже небезпечний для пішоходів[6].

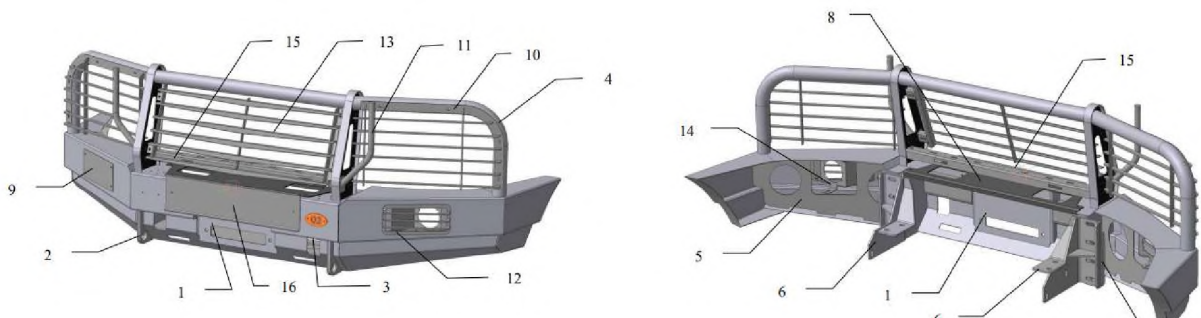


Рисунок 1.6 Передній бампер Mitsubishi

На основі проведеного аналізу умов експлуатації та конструктивних особливостей переднього бампера автомобіля, сформовано комплекс технічних вимог, що потребує пошуку принципово нових матеріалознавчих та технологічних рішень. Щоб бампер задовольняв умовам жорсткості та вібростійкості, витримував низькошвидкісні динамічні удари (до 5 – 8 км/год) без крихкого руйнування та утворення наскрізних тріщин, захищаючи силовий каркас кузова та мінімізуючи травматизм пішоходів.

Також він повинен мати за можливістю мінімальну масу для покращення розваговки, підвищення паливної ефективності та зменшення загальної інерції транспортного засобу. Бампер повинен зберігати стабільність механічних властивостей у температурному діапазоні від -40 °C до +80 °C та бути стійким до дії агресивних дорожніх реагентів.

Традиційні матеріали (штампована сталь чи литі термопласти на зразок поліпропілену) не здатні повною мірою забезпечити одночасне виконання всіх зазначених вимог через обмеження за вагою або схильність до деструкції та крихкості на морозі. Тому найкращим варіантом буде виготовити бампер із полімерного композитних матеріалу [1;2;13].

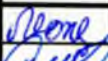
1.3 Постановка задачі

1. Вибрати та удосконалити композитний матеріал бамперу для покращення таких експлуатаційних характеристик як ,ударна стійкість, жорсткість, та при цьому залишити головні критерії як термостійкість хімічна стійкість та вага матеріалу.

2. Вибрати компоненти та тип армування композитного матеріалу з урахуванням статичних та динамічних навантажень на бампер.

3.Виходячи зі складу композиційного матеріалу вибрати технологію виробництва бамперу для отримання оптимальних фізико-механічних характеристик виробу.

					134.4161.05.ПЗ.01	Лист
						13
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

					134.4161.05.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 2	Літ.	Арк.	Аркушів
Студент		Леоненко О.О.						
Керівник		Соломонюк Н.С.					14	
Н. контр.		Захарова І.О.				НУК		
Зав. каф.		Бобров М.М.						

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЕРЕДНЬОГО БАМПЕРА

2.1 Армуючі матеріали

Армуючі матеріали сприймають основні механічні навантаження композиту, тоді як матриця зв'язує їх до купи [1;2;13;15].

Форми випуску армувальних матеріалів:

Дискретні (короткі або довгі волокна): Додаються прямо в розплавлений пластик перед формуванням під тиском. Це дешевше, але деталь виходить менш міцною.

Тканини (плетені мати): волокна переплітаються під кутами 0°, 45°, 90°. Забезпечують максимальну міцність у заданих напрямках удару.

Мультиаксіальні тканини: шари волокон укладені в кількох напрямках і прошиті ниткою. Ідеально підходять для поглинання складних косих ударів.

Щоб виготовити найкращий матеріал потрібно його порівняти з усіма підходящими матеріалами це ми зробимо у таблиці 2.1

2.1.1 Вуглецеве волокно

Характеристики: надзвичайно висока питома міцність, жорсткість і легкість. Карбон має дуже низьку густину, при цьому перевершує сталь і алюміній за міцністю [1;2;10;13].

Температурна стійкість: витримує високі температури до 150–180 °C без втрати механічних властивостей.

Особливості обробки: потребує автоклава або вакуумної інфузії; висока вартість обладнання і матеріалу (препрегів).

Застосування: спортивні авто, авіація, велоспорт.

Недоліки: висока собівартість, крихкість при точковому ударі, низька

Ремонтопридатність

					134.4161.05.ПЗ.02	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		15

2.1.2 Арамідне волокно (кевлар) [13;15]

Характеристики: висока ударостійкість і в'язкість, не кришиться при ударі, дуже міцне на розрив.

Температурна стійкість: до ~160–200 °С.

Особливості обробки: важко ріжеться, погано шліфується, гігроскопічний.

Застосування: броня, мотоциклетні шоломи, гоночні костюми.

Недоліки: втрачає жорсткість, не тримає форму, вологопоглинання.

2.1.3 S-скло (високоміцне скловолокно) [11;13]

Температурна стійкість: до ~170–200 °С.

Особливості обробки: легше в роботі, ніж карбон; використовується як армуючий шар.

Застосування: бронежилети, ракети, авіація, гібридні композити.

Недоліки: менш жорстке, ніж карбон, дорожче за Е-скло.

Підходить для гібридного підсилення.

2.1.4 Е-скло (звичайне скловолокно) [13]

Температурна стійкість: до ~100–120 °С.

Особливості обробки: дешево та просто у формуванні.

Застосування: кузовні частини, побутова техніка, човни.

Недоліки: нижча механічна міцність, швидко старіє, крихке.

2.1.5 Базальтове волокно

Температурна стійкість: до 600°С (набагато вище за скловолокно)

Обробка: схожа на Е-скло, підходить для термостійких композитів

Переваги: екологічність, висока міцність, дешевше за карбон

Недоліки: менш розвинена технологічна база, гірша естетика

2.1.6 UHMWPE (надвисокомолекулярний поліетилен [13;14]

Температурна стійкість: до 100°С

Переваги: найвища ударна в'язкість серед волокон

					134.4161.05.ПЗ.02	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		16

Недоліки: дуже погана адгезія до смол, нестабільність при температурі, непридатне для жорстких конструкцій

Таблиця 2.1 Властивості волокон [10, 11, 13, 15]

Волокно	Міцність на розрив МПа	Теплостійкість, °C	Густина г/см ³	Особливості
Вуглецеве волокно	3500-6000	~200 – 250	1.75-1.80	Дуже легке, жорстке, крихке при ударі
S-скло	4500-5100	~160 – 200	~2.46	Висока міцність і термостійкість, гнучке
E-скло	3400-3500	~120 – 150	~2.58	Дешево, масове використання, гірші властивості за S-скло
Арамідне волокно	2900-3600	~200	~1.44	Дуже ударостійкий, гнеться, важко обробляти
Базальтове волокно	2900-4850	До 600	~2.70	Екологічне, недороге, висока термостійкість
UHMWPE	1500-2000	До~100	~0.97	Легке, надзвичайна в'язкість, погана адгезія до смол

E-скло (звичайне скловолокно) - не підходить, тому що не витримує динамічних навантажень та температур.

Кевлар (арамідне волокно) - не підходить, тому що погано зберігає геометрію при механічному навантаженні.

UHMWPE - надзвичайно ударостійкий, але не придатне до жорстких конструкцій, погана адгезія со смолами та має малу теплостійкість.

Базальт - потенційно цікавий, але не має кращих характеристик за S-скло у поєднанні з карбоном.

Для переднього бампера найкращим рішенням є використання Армованої гібридної системи вуглеволокна та S-скла, що забезпечує баланс між високою жорсткістю (Вуглеволокно), ударною в'язкістю (S-скло), естетичністю, теплостійкістю та низькою вагою.

2.2 Вибір полімерної матриці

Основні види полімерів:

1) Термопласти (термопластичні полімери) - вони мають лінійну або розгалужену структуру молекул, тому при нагріванні вони розм'якшуються і переходять у рідкотекучий стан, а при охолодженні - знову твердіють. Цей процес є повністю оборотним, що дозволяє переробляти їх повторно багато разів [1;2;13].

2) Реактопласти (Термореактивні полімери)-у процесі твердіння їх молекули зшиваються у тривимірну сітчасту структуру. Процес необоротний, при повторному нагріванні вони руйнуються [1;2;13].

Для полімерних композитних матеріалів в якості наповнювача найчастіше застосовуються реактопласти.

Вони поділяються за видами твердіння:

а) Полімери холодного твердіння

Процес відбувається за кімнатної температури (від +15°C до +25°C) без додаткового зовнішнього нагріву. Реакція запускається шляхом змішування смоли (основи) та спеціального активного затверджувача в точних пропорціях.

Характеристики та особливості:

- Час життєздатності: зазвичай короткий (від 15 хвилин до кількох годин). Після змішування компонентів суміш потрібно швидко використати, поки вона не втратила текучість.
- Швидкість процесу: Первинне затвердіння (до стану відлипу) триває від кількох годин до доби. Повний набір максимальної міцності може тривати від 3 до 7 діб. Термостійкість матеріалу: Зазвичай низька або середня. Отриманий пластик втрачає жорсткість та починає розм'якшуватися вже при температурах +60°C...+80°C.
- Механічні властивості: Матеріал має хорошу міцність, але залишається більш крихким і має вищу внутрішню напругу, ніж аналоги гарячого типу.

Головні переваги: не потребує дорогого обладнання (печей, автоклавів, термокамер), проста технологія, ідеальна для ручного формування, ремонту або дрібносерійного виробництва.

					134.4161.05.ПЗ.02	Лист
						18
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Головні недоліки: нижчі експлуатаційні характеристики готового виробу. чутливість до вологості та коливань температури в приміщенні під час роботи.

б) Полімери гарячого (термічного) твердіння

Процес потребує примусового нагрівання у спеціальних печах, термошафах чи автоклавах. Робочі температури зазвичай становлять від $+60^{\circ}\text{C}$ до $+180^{\circ}\text{C}$ (іноді вище), залежно від марки полімеру. Затверджувачі в таких системах активуються виключно під дією тепла.

Характеристики та особливості:

- Час життєздатності: Дуже тривалий. За кімнатної температури суміш або готовий напівфабрикат (препрег) може зберігати текучість днями, тижнями чи навіть місяцями (у холодильнику). Це дозволяє без поспіху викладати складні шари армувального матеріалу.
- Швидкість процесу: У розігрітій печі реакція відбувається дуже швидко й рівномірно (від кількох десятків хвилин до кількох годин).
- Термостійкість матеріалу: Висока. Готові вироби легко витримують нагрівання до $+120^{\circ}\text{C} \dots +250^{\circ}\text{C}$ без втрати жорсткості та форми.
- Механічні властивості: Максимально можливі для реактопластів. Молекулярна сітка виходить дуже щільною та однорідною. Матеріал має екстремальну міцність, стійкість до тріщин та вібраційних навантажень.

Головні переваги: Найвищі фізико-механічні характеристики матеріалу. Відсутність внутрішніх напружень у деталі після правильного циклу охолодження. Стабільна якість, що не залежить від погоди в цеху.

Головні недоліки: Потребує великих витрат енергії на нагрів. Необхідне дороге обладнання (термокамери, оснащення, що витримує високі температури).

Основні вимоги до полімеру:

- Реактопласт гарячого твердіння
- Висока адгезія до волокон (карбон + S-скло).
- Добра термічна стабільність (не менше $120-150^{\circ}\text{C}$).
- Стійкість до атмосферного впливу (УФ, волога, сіль).
- Відносно невисока вартість, якщо порівнювати з авіаційними епоксидками.

Фізико-механічні властивості реактопластів приведені у таблиці 2.2

					134.4161.05.ПЗ.02	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		19

Таблиця 2.2 Фізико-механічні властивості реактопластів

Тип смоли	Епоксидна	Вінілестерна	Поліефірна	Поліімідна	Поліуретанова
Густина, г/см ³	1,15–1,30	1,05–1,15	1,10–1,40	1,30–1,45	1,00–1,25
Міцність при розтягу, МПа	60–90	70–85	40–70	90–130	20–60
Модуль пружності, ГПа	2,5–4,5	3,0–3,8	2,0–3,5	3,0–5,0	0,05–2,5
Усадка, %	0,5–2,0	3–5	5–8	1–2	1–4
Температура експлуатації, °С	120–160	до 150	100–130	до 300	90–120
Переваги	стійка до вологи, хімікатів, механіки	стійкість до хімії, краща жорсткість, ніж поліефір	доступна, проста в роботі	стійкі до окислення і високих температур	гнучкість, дешевизна
Недоліки	дорожча за поліефірну, має чіткі вимоги до пропорцій змішування	поступається епоксидній за жорсткістю та довговічністю	менша міцність, вища усадка, погана адгезія до карбону	дорогі, застосовуються здебільшого в аерокосмічній галузі	не забезпечує потрібної жорсткості, слабка термостійкість

У результаті аналізу полімерних матеріалів зроблено висновок що, найкращим для бампера є реактопласт гарячого твердіння а саме епоксидна смола. Ключова перевага якої зумовлена такими факторами:

- 1) Гарна адгезія смола забезпечує надійний хімічний зв'язок з волокнами (карбоном, скловолокном), гарантуючи монолітність конструкції та ефективний розподіл зусиль під час згину чи розтягу.
- 2) Мінімальна усадка (до 1%): на відміну від поліефірних аналогів, епоксидна матриця твердіє без утворення внутрішніх мікронапружень та мікротріщин.
- 3) Висока ударна в'язкість: структура матеріалу ефективно демпфує динамічні коливання та поглинає кінетичну енергію удару, запобігаючи миттєвому крихкому руйнуванню та деламінації (відшаруванню) композита.

Таким чином, використання епоксидної смоли гарячого твердіння дозволяє отримати максимальну питому міцність, довговічність та стійкість до втомних вібраційних навантажень, що є критично важливим для безпеки передньої частини автомобіля.

2.3 Вибір декоративного захисного покриття

Оскільки бампер окрім механічних навантажень має ще хімічні та теплові задля покращення цих характеристик нам потрібно підібрати гелькоут який буде захисним та декоративним покриттям.

2.3.1. Ортофталеві гелькоути (Orthophthalic / Ortho)

Найпростіший, базовий і найдешевший вид на основі поліефірної смоли[13].

Особливості: Має середні механічні властивості та слабку стійкість до ультрафіолету і хімії.

Сфера застосування: Прості внутрішні деталі, недорогі вироби, що не зазнають великих навантажень і не контактують з агресивним середовищем.

2.3.2. Ізофталеві гелькоути (Isophthalic / Iso)

Покращений поліефірний гелькоут з вищою щільністю молекулярної Решітки [13].

Особливості: Хороша стійкість до води (гідролізу), хімічних речовин та атмосферних явищ. Значно еластичніший за ортофталевий.

Сфера застосування: Виробництво катерів, човнів, автомобільних тюнінг-деталей середнього класу, зовнішніх панелей.

2.3.3. Ізофталеві на неопентилгліколі (ISO/NPG)

Преміальний підвид поліефірних матеріалів. Хімічна формула змінена для максимального захисту поверхні [13].

Особливості: Найвища стійкість до ультрафіолету (не жовтіє на сонці), глянсовий блиск, відмінна стійкість до подряпин і агресивних мийних засобів.

Сфера застосування: Дорогі яхти, басейни, стільниці, преміальні зовнішні деталі транспорту.

2.3.4. Вінілефірні гелькоути (Vinylester)

Проміжний вид між поліефірами та епоксидами, що поєднує їх найкращі якості [13;14].

					134.4161.05.ПЗ.02	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		21

Особливості: Екстремальна стійкість до хімікатів (кислот, лугів, солей) та високих температур. Має дуже високу ударну в'язкість (еластичність при ударах).

Сфера застосування: Хімічні резервуари, форми (матриці), високоміцні елементи автоспорту, деталі, що працюють у важких умовах.

2.3.5. Епоксидні гелькоути (Ероху)

Найвища ланка серед композитних покриттів, виготовляються на основі епоксидних смол [1;2;13].

Особливості: Максимальна механічна міцність, нульова усадка при застиганні, залізобетонна адгезія до вуглеволокна (карбону). Витримує величезні вібраційні та температурні навантаження, але чутливий до чистого УФ-випромінювання (потребує лакування).

Сфера застосування: Авіабудування, космічна галузь, професійний автоспорт (деталі суперкарів), високоточні матриці.

Отже для кращого захисту від хімічних ударних та температурних напружень оберемо Епоксидний гелькоут задля кращої адгезії та міцності

2.4 Висновок за розділом

На основі отриманих характеристик було встановлено, що найкращим рішенням є гібридна композитна структура, яка поєднує:

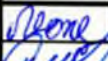
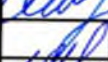
Вуглецеве волокно - для забезпечення високої жорсткості, малої ваги та естетичного вигляду;

S-скловолокно - для покращення ударостійкості, гнучкості та надійності під час зіткнень.

Епоксидна смола- сполучник гарною адгезією що забезпечить якість композита, та висока ударна в'язкість Епоксидний гелькоут-захисний декоративний матеріал, який має найкращу адгезію з вуглеволокном та епоксидною смолою, та найкращу механічну міцність.

Це поєднання дозволяє створити оптимально збалансований бампер, який відповідає сучасним вимогам до безпеки, ваги та механічної міцності.

					134.4161.05.ПЗ.02	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		22

					134.4161.05.ПЗ			
Зми.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 3	Літ.	Арк.	Аркушів
Студент		Леоненко О.О.					23	
Керівник		Соломонюк Н.С.						
Н. контр.		Захарова І.О.				НУК		
Зав. каф.		Бобров М.М.						

РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК НАВАНТАЖЕНЬ ТА МІЦНОСТІ КОМПОЗИТНОГО БАМПЕРА

3.1 Геометричні характеристики бампера

По перше потрібно в'ясувати за якими розмірами розглядати нашу балку, та чи можна розглядати її як пряму, бо бампер має невелике скруглення. На рисунку (3.1) можна побачити геометричні розміри бампера [3].

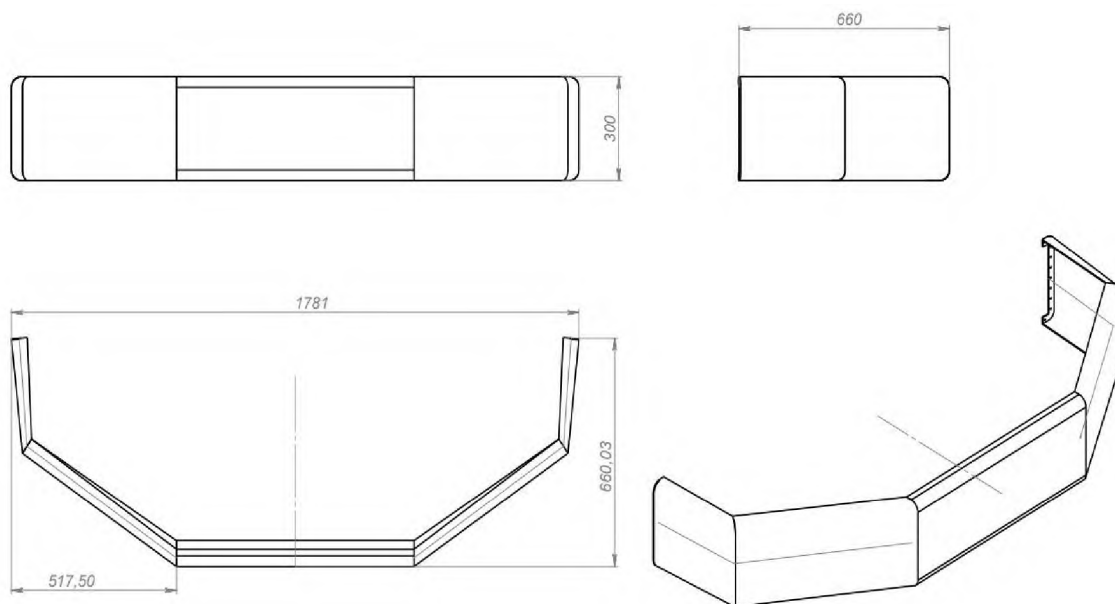


Рисунок 3.1 Схема загальних розмірів бампера

Для первинного збору зовнішніх навантажень та визначення зусиль, бампер розглядається як пряма балка (прямий стрижень). Дане припущення обґрунтовано геометричним критерієм пологості за теорією Вінклера-Баха та С. П. Тимошенка. Відношення радіуса кривизни осі бампера (R) до довжини його дуги між опорними точками (S) становить формула(3.1) [3]:

$$\frac{R}{S} = \frac{1}{\alpha} \quad (3.1)$$

Знайдемо радіус кривизни бампера:

$$R^2 = \left(\frac{1781}{2}\right)^2 + (R - 660)^2 \quad R = \frac{4914361}{5280} = 930.75 \text{ м}$$

Відповідно за формулою 3.1 знайдемо відношення радіуса кривизни до осі бампера:

$$\frac{R}{660} = 1.41 \text{ М}$$

Оскільки отриманий коефіцієнт задовольняє умові $K \leq 1.0 \dots 1.5$ (що відповідає центральному куту охоплення $\alpha \leq 38^\circ \text{С} \dots 57^\circ \text{С}$, бампер класифікується як слабковигнутий брус .Відповідно до положень будівельної механіки, похибка від нехтування кривизною при визначенні згинальних моментів та поперечних сил не перевищує 2–4%, що є допустимим для інженерних розрахунків першого наближення перед розрахунком композитної структури» [3].

На етапі первинного збору зовнішніх сил, що діють на елементи кузова автомобіля під час руху, ключовим є врахування швидкісного напору повітряного потоку (лобового опору) . Для проведення інженерних розрахунків реальна криволінійна конструкція підсилювача бампера, яка задовольняє критерію пологості Вінклера-Баха умові $K \leq 1.0 \dots 1.5$ трансформується в еквівалентну расчетну схему прямого стрижня (балки) довжиною L під дією рівномірно розподіленого навантаження.

Розрахунок розподіленого навантаження [3] за даними:

$$\rho_{air} = 1.225 \text{ кг/м}^3 \quad V = 33.33 \text{ м/с}$$

Відповідно до рівняння Бернуллі для нестисливого газу, величина цього тиску (швидкісного напору) q визначається швидкістю руху автомобіля та щільністю середовища[3;12]:

$$q_{aero} := \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot V^2 = 680.419 \text{ Па}$$

Відповідно до правил будівельної механіки інтегрування тиску за висотою перерізу виконується шляхом множення швидкісного напору Бернуллі [12] на габаритну висоту фронтальної проекції підсилювача бампера

$$q := 680.419 \cdot 0.3 = 204.126 \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

Відповідно розподілене навантаження на балку дорівнює 204.126 Н/м

					134.4161.05.ПЗ.03	Лист
						25
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

З метою аналізу міцності та жорсткості підсилювача бампера, еквівалентна пряма балка прольотом L розглядається у двох незалежних розрахункових випадках. Це дозволяє окремо оцінити вплив розподіленого швидкісного напору повітря та локальних зусиль, що виникають у вузлах кріплення конструкції до кузова.

Розрахунок ударного навантаження Силу удару бампера зазвичай визначають через енергію удару E_k та величину деформації $F_{сер}$ (3.3).

$$E_k = \frac{mv^2}{2} \quad (3.2)$$

$$F_{сер} = \frac{E_k}{\delta} \quad (3.3)$$

де m - маса автомобіля, кг; v - швидкість удару, м/с; δ - сумарна деформація бампера та енергопоглинач, м.

Для автомобіля масою 1935 кг швидкість удару 1.38 м/с сумарна деформація 0.05 м, тоді навантаження буде 26 кН. Частіше за всього беруть навантаження 30 кН за таким правилом- UNECE. [17]

3.2 Розрахунок зовнішніх навантажень на бампер

На бампер діють зовнішні навантаження, такі як тиск повітря на швидкості 120 км/год який ми розраховали за формулою Бернуллі, температурні навантаження, 90 °C при сонці та роботі двигуна, -20°C за кліматичними умовами, та ударне навантаження на швидкості 5 км/год. Оскільки ударне 5 км/год навантаження та тиск повітря на швидкості 120 км/год, ні в яких умовах не можуть діяти на бампер одночасно, розрахуємо дві схеми зовнішніх навантажень при повітряному тиску (Рис.3.3) та при низько швидкісному удару (Рис 3.2).

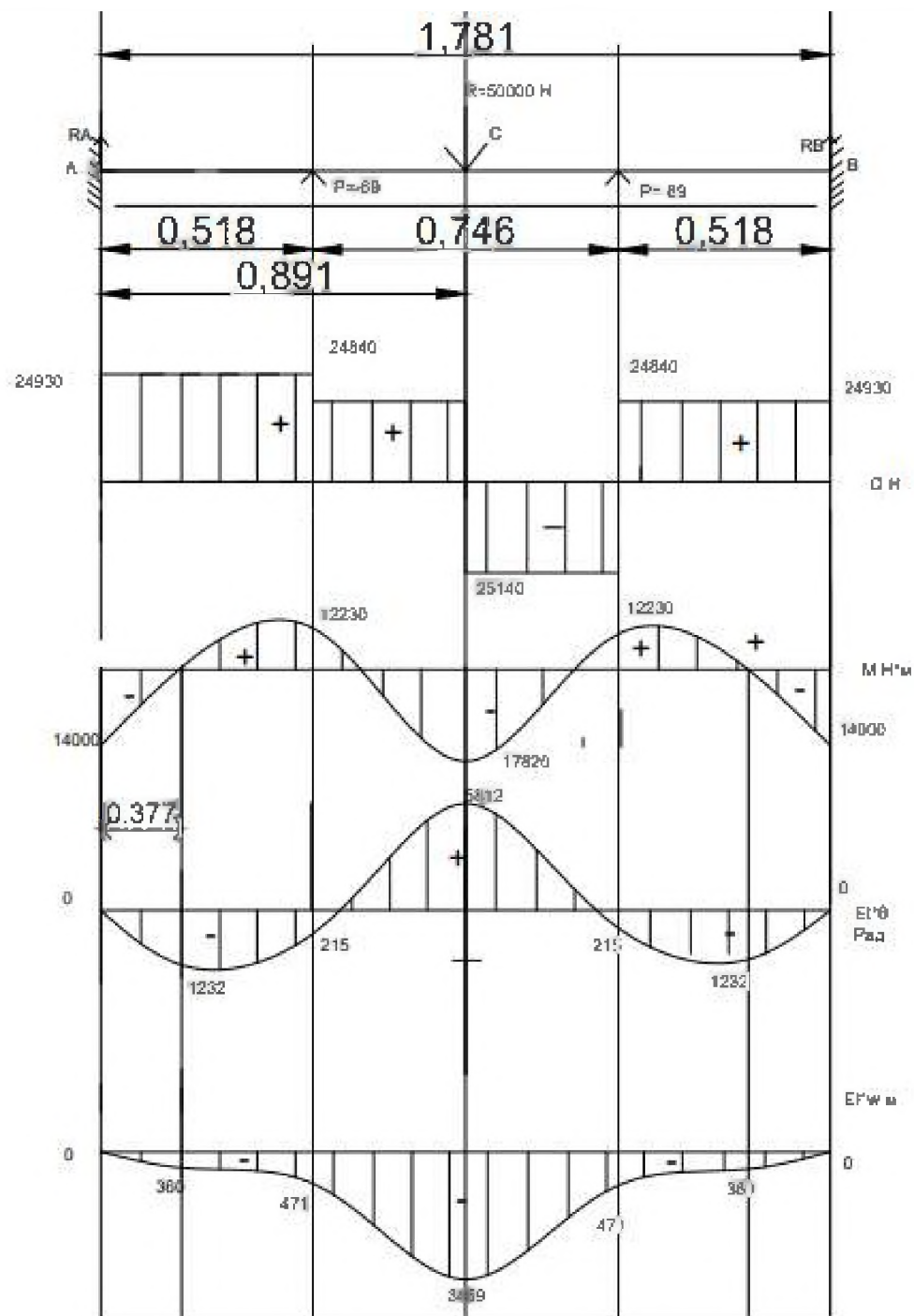


Рисунок 3.2 Схема розрахунків низько швидкісного удару

3.2.1 Обґрунтування та вибір розрахункових схем навантаження бампера.

Схема розподіленого навантаження .Дана схема моделює роботу бампера під дією розподіленого тиску швидкісного напору повітряного потоку під час руху автомобіля таблиця 3.1. Поверхневий динамічний тиск інтегрується за

висотою профілю і прикладається до балки як лінійне розподілене навантаження інтенсивністю $q(\text{H/м})$ [3]

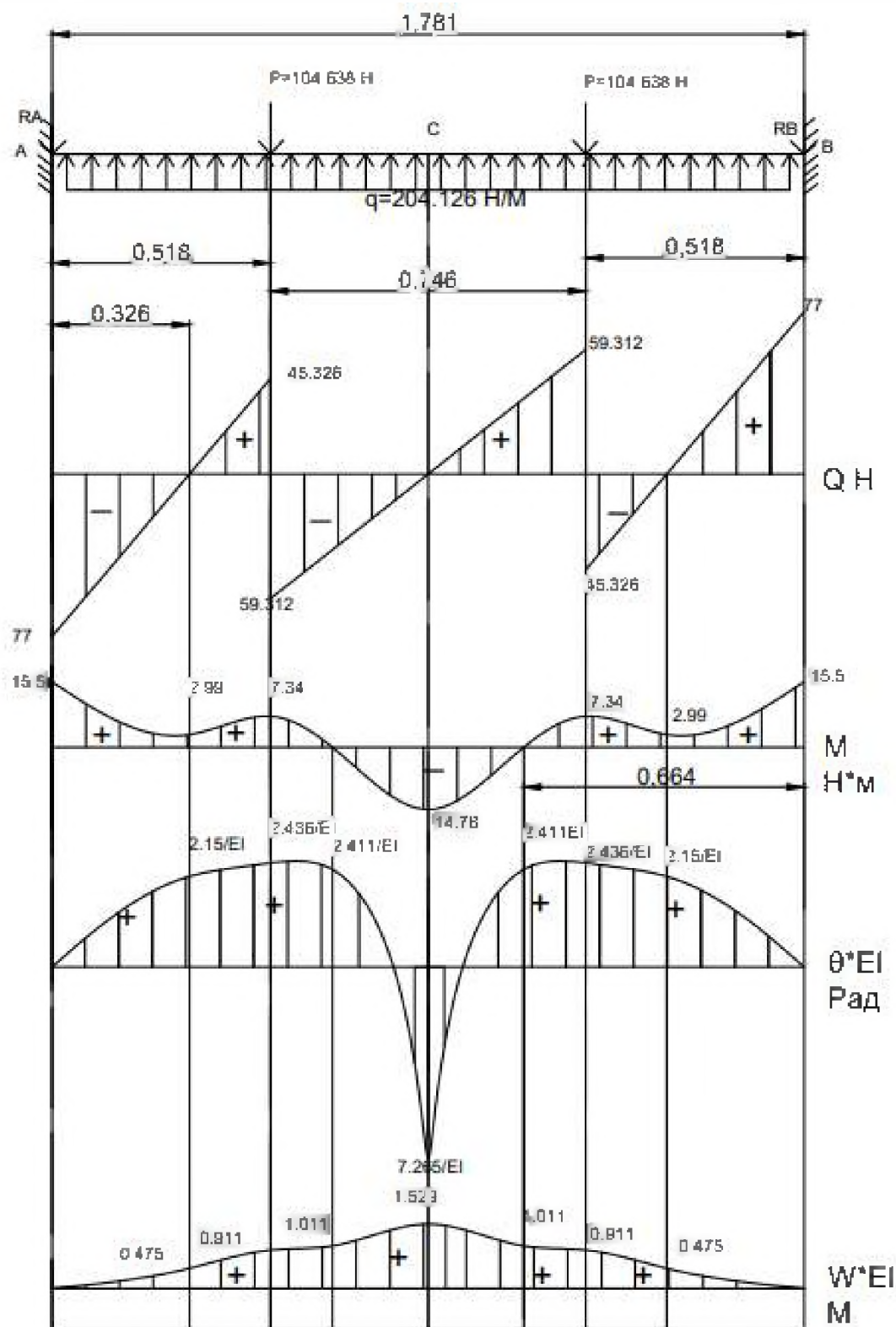


Рисунок 3.2 Схема розрахунок повітряного тиску

Схема зосереджених навантажень [3]. Дана схема моделює локальну силову взаємодію бампера з несучими кронштейнами утримувальних систем

кузова таблиця 3.2. Навантаження від взаємодії з кронштейнами прикладається у вигляді системи зосереджених сил P (Н) у точках їхнього фактичного конструктивного розташування. За даною схемою можна розрахувати реакцій опор.

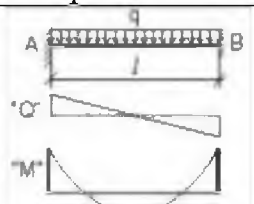
Для спрощення аналізу та детального дослідження впливу кожного силового фактора окремо, першочергово будуються одиничні епюри від кожного кронштейна. Оскільки дана схема характеризується високим градієнтом напружень, вона є критичною для перевірки локальної міцності композитного ламінату в зонах концентрації напружень біля монтажних отворів.

Синтез розрахункових випадків та побудова сумарних епюр

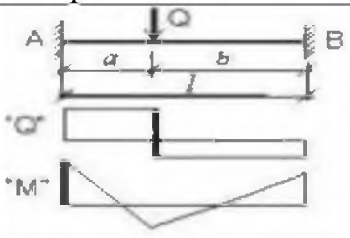
Для визначення найбільш небезпечного стану конструкції бампера під час одночасної дії всіх експлуатаційних факторів використовується принцип суперпозиції (незалежності та накладання дій сил) [3]. Об'єднання окремих розрахункових випадків у єдину розрахункову модель виконується шляхом аналітичного та графічного сумування відповідних внутрішніх зусиль. На основі індивідуальних епюр для кожної зосередженої сили кронштейнів та розподіленого аеродинамічного навантаження будуються підсумкові графіки. Оскільки сила P нам невідома усі розрахунки проводимо виводячи силу P за душки.

За таблицями 3.1, 3.2 розрахуємо розподілене навантаження, ударне та реакцію опор таблиця 3.3 [3].

Таблиця 3.1 Розрахунок розподіленого навантаження

Схема навантажень епюр	Опорні реакції	Момент на опорах	Момент на прольоті
	$A = B = \frac{q * l}{2}$	$-M_A = M_B = \frac{q * L^2}{12}$	$M_x = \frac{q * x(L - x)}{2} - \frac{q * L^2}{12}$ $M_{max} = \frac{q * L^2}{24}$

Таблиця 3.2 Схема зосередженого навантаження

Схема навантажень епюр	Опорні реакції	Момент на опорах	Момент на прольоті
	$A = \frac{Q(3a+b)b^2}{L^3}$ $B = \frac{Q(a+3b)a^2}{L^3}$	$M_A = \frac{Qab^2}{L^2}$ $M_B = \frac{Qba^2}{L^2}$	$M_x = Ax + Ma \quad (0 < x < a)$ $M_{max} = Aa + M_A = Bb + M_B$

Таблиця 3.3 Розрахунок навантажень на окремих епюрах

Довжина м	Розподілене навантаження q		Реакція опор Р		Ударне навантаження R	
	M Н*м	Q Н	M Н*м	Q Н	M Н*м	Q Н
B(1.781)	53.957	181.77	$P \cdot \frac{(0.5175-1.2635)}{L}$	0	7421	25000
A(0)	53.957	181.77	$P \cdot \frac{(0.5175-1.2635)}{L}$	0	7421	25000
T.(0.5175)	4.55	59.312	$P \cdot \frac{(0.5175-1.2635)}{L} + P \cdot 0.5175$	+P	-	-
T.(1.26)	4.55	59.312	$P \cdot \frac{(0.5175-1.2635)}{L} + P \cdot 0.5175$	-P	-	-
C(0.8905)	26.978	0	$P \cdot \frac{(0.5175-1.2635)}{L} + P \cdot 0.5175$	0	3710	50000

3.2.2 Розрахунок розподіленого навантаження об'єднаних схем

Об'єднання схем використовуючи принцип суперпозиції (незалежності та накладання дій сил)[3]:

Таблиця 3.6 Розрахунок формул Q,M, зосередженого навантаження

Довжина м	Q Н	M, Н·м
B(1.781)	$\frac{P(q \cdot L)}{2} = P \cdot 181.774$	$\frac{(q \cdot L^2)}{12} = 53.957$
T.(0.5175)	$\frac{(q \cdot 0.5175)}{L} = 59.312$	$\frac{(q \cdot 0.5175^2)}{12} = 4.556$
T.(1.26)	$\frac{(q \cdot 0.5175)}{L} = 59.312$	$\frac{(q \cdot 0.5175^2)}{12} = 4.556$

Довжина м	Q Н	M, Н·м
C(0.8905)	0	$\frac{(q \cdot L^2)}{24} = 26.978$
A(0)	$\frac{P(q \cdot L)}{2} = P \cdot 181.774$	$\frac{(q \cdot L^2)}{12} = 53.957$

На основі епюри згинальних моментів методом Бубнова [3] складено рівняння пружної лінії балки . Після інтегрування рівняння моменту інерції отримано вирази для кута повороту та прогину .

Рівняння навантажень Q (3.1):

$$P(x) = (P - 181.77) + qx + |0.517| - P + |1.263| - P \quad 3.1$$

Рівняння моменту(3.2):

$$M(x) = \left[-P \cdot \frac{(a-b)}{L} + 53.957 \right] + (P - 181.77)x + \frac{qx^2}{2} + ||0.517|| - P \cdot (x - 0.517) + ||1.263|| - P \cdot (x - 1.263) \quad 3.2$$

Рівняння кута повороту(3.3):

$$\theta(x) = \frac{1}{EI} \left[(-0.367 \cdot P + 53.957) \cdot x + \frac{(P - 181.77)}{2} \cdot x^2 + \frac{qx^3}{6} + ||0.517|| - P \cdot \frac{(x - 0.517)^2}{2} + ||1.263|| - P \cdot \frac{(x - 1.263)^2}{2} \right] \quad 3.3$$

Рівняння максимального прогину W(3.4):

$$W(x) = \frac{1}{EI} \left[(-0.367 \cdot P + 53.957) \cdot \frac{x^2}{2} + \frac{(P - 181.77)}{2} \cdot \frac{x^3}{3} + \frac{qx^4}{24} + ||0.517|| - P \cdot \frac{(x - 0.517)^3}{6} + ||1.263|| - P \cdot \frac{(x - 1.263)^3}{6} \right] \quad 3.4$$

Отже, за рівнянням прогину ($X=L/2$) (3.4) та за величиною максимального прогину балки, де максимальний прогин не повинен перевищувати довжину балки поділену на 300[3] можемо визначити значення P:

$$\left[\frac{q \cdot L^2}{12} - P \cdot \frac{(a-b)}{L} \right] \cdot \frac{x^2}{2} + (-181.77 + P) \cdot \frac{x^3}{6} + \frac{(q \cdot x^4)}{24} - P \cdot \frac{(x - 0.517)^2}{6} = \frac{L}{300}$$

Отже P=104.638Н

На схемі зосередженого навантаження Q (рис 3.1) можна побачити нульові значення , потрібно порахувати довжину прольоту в цих точках на бампері, за рівнянням 3.2.2.1 можна визначити довжину x_Q .

$$(P - 181.77) + q \cdot n = 0 \text{ solve } \rightarrow 0.37786520756573033185$$

					134.4161.05.ПЗ.03	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		31

Далі розраховуються епюри моментів та Q. Результат представлений в таблиці (3.5):

Таблиця 3.5 Розрахунок навантажень на довжині прольоту

Точка(довжина м) м	M Н*м	Q Н
B(1.781)	15.541	77.132
A(0)	15.541	77.132
T.(0.5175)	7.34	45.326
T.(0.5175)	7.34	45.326
C(0.8905)	14.78	-
(0.377)	2.99	

На (рис3.2) на схемі моментів є ділянки з значенням 0, потрібно знайти довжину прольоту (x_M) на цих ділянках за рівнянням[3](3.2):

$$(-P \cdot 0.367 + 53.957) + (P - 181.77)t + \frac{(q \cdot t^2)}{2} - P \cdot (t - 0.5175) = 0 \text{ solve}$$

Довжина прольоту на цих ділянках дорівнює $x_M = 0.558\text{м}$ та $x_M = 1.222\text{м}$

За рівнянням (3.3) та рівнянням (3.4) можемо побудувати епюру кутів поворотів та максимальний прогин. балки[3] таблиця (3.4)

Таблиця 3.4 Розрахунок кутів повороту та прогину

Довжина м	$\theta \cdot EI$, рад	$w \cdot EI$, м
0.5175	2.436	0.911
1.26	2.436	0.911
0.89	-7.265	1.529
0	0	0
1.781	0	0
0.377	2.15	0.475
1.404	2.15	0.475

3.2.3 Розрахунок ударного навантаження на об'єднаних схемах

Розрахунок виконується як і за пунктом 3.2.2 об'єднання схем виконується за принципом супер позиції у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 Розрахунок формул Q,M, зосередженого навантаження

Довжина м	Q Н	M Н*м
B(1.781)	$\frac{R}{2} + P$	$\frac{-R \cdot 1.782}{8} + \frac{P \cdot a \cdot b^2}{L^2} + \frac{-P \cdot a^2 \cdot b}{L^2}$
T.(0.5175)	$Ra + P$	$Ma + Ra \cdot 0.5175 = 1.223 \times 10^4$
T.(1.26)	$Ra + P$	$Ma + Ra \cdot 0.5175 = 1.223 \times 10^4$
C(0.8905)	$Ra + P - R$	$Ma := \frac{-R \cdot 1.782}{8} + \frac{P \cdot a \cdot b^2}{L^2} + \frac{-P \cdot a^2 \cdot b}{L^2} = -1.14 \times 10^4$
A(0)	$\frac{R}{2} + P$	$\frac{-R \cdot 1.782}{8} + \frac{P \cdot a \cdot b^2}{L^2} + \frac{-P \cdot a^2 \cdot b}{L^2}$

На основі епюри згинальних моментів методом Бубнова[3] складено рівняння пружної лінії балки . Після інтегрування рівняння моменту інерції отримано вирази для кута повороту та прогину .

Рівняння навантажень Q (3.5):

$$P(x) := (P - 181.77) + qx + |0.517| - P + |1.263| - P \quad (3.5)$$

Рівняння моменту(3.6):

$$M(X) := Ma + [Ra \cdot x + ||0.5175|| + P \cdot (x - 0.5175) - ||0.89|| - R \cdot (x - 0.89) + ||1.26|| + R \cdot (x - 1.26)] \quad (3.6)$$

Рівняння кута повороту(3.7):

$$\theta(x) := \frac{1}{E \cdot I} \left[Ma \cdot x + \left[\left(Ra \cdot \frac{x^2}{2} \right) + ||0.5175|| + \frac{[P \cdot (x - 0.5175)^2]}{2} - ||0.89|| - \frac{[R \cdot (x - 0.89)^2]}{2} + ||1.26|| + \frac{[R \cdot (x - 1.26)^2]}{2} \right] \right] \quad (3.7)$$

Рівняння максимального прогину W(3.8):

$$w(x) := \frac{1}{E \cdot I} \left[Ma \cdot \frac{x^3}{6} + \left[\left(Ra \cdot \frac{x^3}{6} \right) + ||0.5175|| + \frac{[P \cdot (x - 0.5175)^3]}{6} - ||0.89|| - \frac{[R \cdot (x - 0.89)^3]}{6} + ||1.26|| + \frac{[R \cdot (x - 1.26)^3]}{6} \right] \right] \quad (3.8)$$

Отже, за рівнянням максимального прогину (3.8) та за величиною максимального прогину балки, де максимальний прогин не повинен перевищувати довжину балки поділену на 300 [3] можемо визначити значення P:

$X = L/2$ тобто середині балки.

$$\left(\frac{-R \cdot 1.782}{8} + \frac{P \cdot a \cdot b^2}{L^2} + \frac{-P \cdot a^2 \cdot b}{L^2} \right) \cdot \frac{x^2}{2} + \left[\frac{R}{2} + (-P) \right] \cdot \frac{x^3}{6} + \left[\frac{P \cdot (x - 0.5175)^3}{6} \right] = \frac{L}{300}$$

Отже $P = -30,6 \text{ кН}$

Тепер можливо порахувати значення на епюрах моментів та перерізуючих сил (Таблиця 3.6):

Таблиця 3.6 Розрахунок навантажень балки по довжині прольоту

Точка(довжина м) м	М Н·м	Q, Н
B(1.781)	7446	24930
A(0)	7446	24930
T.(0.5175)	1290	24860
T.(1.26)	1290	24860
C(0.8905)	3649	50000

На (рис3.3) на схемі моментів є ділянки з значенням 0, потрібно знайти довжину прольоту (x_0) на цих ділянках за рівнянням (3.6):

$$\left(-\frac{RL}{8} + \frac{Pab^2}{L^2} - \frac{Pba^2}{L^2}\right)x_0 + P\left(x_0 - \frac{L}{3}\right) = 0$$

$$x_0 = 0.377 \text{ м}$$

За рівнянням (3.6) та рівнянням (3.7) можемо побудувати епюру кутів повороту та максимальний прогин балки таблиця 3.7 [3]. За граничними умовами балки у жорстких закладаннях прогин та кут повороту дорівнюють нулю.

Таблиця 3.7 Розрахунок кутів повороту та прогинів балки

Довжина м	Рад θ	w, м
0.5175	3338/ EI	575/ EI
1.26	3338/ EI	575/ EI
0.89	9869/ EI	575/ EI
0	0	0
1.781	0	0
0.377	1232	360
1.404	1232	360

3.2.3 Температурні навантаження

Оскільки бампер взаємодіє з сонячними променями, знаходиться біля радіатора автомобіля, та піддається температурі повітря. Потрібно розрахувати температурні напруження. Розрахунок температурних напружень буде

проводиться за формулою (3.4) для волокна та формулою (3.5) для матриці.[1;2;3]

$$\sigma_{1B}^T = E_B E_M \Delta T (1 - \psi) \frac{\alpha_M - \alpha_B}{E_B \psi - E_M (1 - \psi)} = \frac{E_B E_M \Delta T (1 - \psi) (\alpha_M - \alpha_B)}{E_1} \quad (3.4)$$

$$\sigma_{1M}^T = E_B E_M \Delta T \psi \frac{\alpha_B - \alpha_M}{E_B \psi + E_M (1 - \psi)} = \frac{E_B E_M \Delta T \psi (\alpha_B - \alpha_M)}{E_1} \quad (3.5)$$

Основні температурні навантаження на бампер:

а) Нагрів від радіатору 90°C

б) Нагрів від сонячних променів 90°C

в) Охолодження від температури повітря -25°C

Температурні навантаження для вуглеволокна:

$$\sigma_{TBC} = E_B E_M \Delta T (1 - \psi) \frac{(\alpha_M - \alpha_B)}{E_B \psi - E_M (1 - \psi)} = 35.417 \text{ МПа}$$

Температурні навантаження для скловолокна:

$$\sigma_{TBC} = E_C E_M \Delta T (1 - \psi) \frac{(\alpha_M - \alpha_C)}{E_C \psi - E_M (1 - \psi)} = 34.371 \text{ МПа}$$

Температурні навантаження для матриці(Епоксидної смоли)

$$\sigma_{TMC} = E_B E_M \Delta T \psi \frac{(\alpha_B - \alpha_M)}{E_B \psi + E_M (1 - \psi)} = -21.707 \text{ МПа}$$

Отже , температурні навантаження дуже малі у порівнянні з міцністю матеріалів:

$$34.371 \text{ МПа} < \sigma_c = 4500 \text{ МПа} \quad 21.707 \text{ МПа} < \sigma_v = 108 \text{ МПа}$$

$$35.417 \text{ МПа} < \sigma_v = 4900 \text{ МПа}$$

Аналіз епюр внутрішніх зусиль, кутів повороту та прогинів показав, що при аеродинамічному навантаженні критичними за міцністю є опорні перерізи А і В, де виникають максимальні згинальний момент $M_{\max} = 15.5 \text{ Н*м}$ та поперечна сила $Q_{\max} = 77 \text{ Н}$. За жорсткістю критичним є центральний переріз С, у якому спостерігаються максимальні прогин $w_{\max} = 3459/EI$ і кут повороту $\theta_{\max} = 7,26/EI$ рад.

При ударному навантаженні максимальна поперечна сила $Q_{\max} = 45660 \text{ Н}$ також виникає в опорних перерізах А і В, однак найбільший згинальний момент $M_{\max} = 17820 \text{ Н}\cdot\text{м}$, прогин $w_{\max} = 3459/EI$ та кут повороту $\theta_{\max} = 5812/EI$ рад зосереджені в центральному перерізі С. Тому переріз С є критичним як за міцністю, так і за жорсткістю.

3.3 Фізико-механічні характеристики

Розрахунок фізико-механічних характеристик буде проводитися методом послідовних наближень. Основна перевага методу полягає в простоті його алгоритмічної реалізації на ЕОМ та можливості досягнення будь-якої заданої точності [1;2].

Для виготовлення композиту були вибрані такі марки матеріалів:

- Вуглеволокно (Toray Toray Industries T700S, плетіння TWIST, наповненням 12K [10])
- Скло волокно S-скло HT-Glass: пропонує великий асортимент якісної тканини за невелику ціну. HT-Glass марки CASW220B-90a (2/2 Twill) [11]
- Для бамперу вибрано марку Sicomin але саме цю модель SR 1710 Injection/SD 882x Structural epoxy system for Resin Transfer Moulding [9]

Рисунок 3.3 (Datasheet Sikomin SR 1710 EVO SD 882x)

Механічні характеристики матеріалів [9,10,11] у таблиці 3.8

Таблиця 3.8 Механічні характеристики матеріалів

Значення	Вуглеткань T700S	S-скло CASW220B-90a	Епоксидна смола SR 1710 EVO SD 882x
Поздовжній модуль Юнга, Е, ГПа	230	86	3,68
Щільність волокна, кг/м ²	0.4	0.236	-
Коефіцієнт Пуасона, μ	0.28	0.22	0.35
Міцність на розтяг, σ , МПа	4900	4500	84
Міцність на зсув, τ , кПа	-	-	54
Густина волокна, ρ , кг/м ³	1800	2480	-
КЛТР, α , К ⁻¹ *10 ⁻⁶	1.6	5.6	60
Міцність на стиск композита, σ , МПа	2800	4000	84

Розрахунок фізико-механічних характеристик елементарних шарів:

За правилом сумішей знайдемо ступінь наповнення волокном композитний матеріал [1;2]:

а)Ступінь наповнення вуглеволокна за даними у таблиці 3.6:

$$\rho_{\text{в.тк}} := \frac{\rho_{\text{в.пов}}}{t_{\text{в.ткан}}} = 615.385 \quad \psi := \frac{\rho_{\text{в.тк}}}{\rho_{\text{в.г}}} = 0.342$$

Ступінь наповнення для скловолокна за даними у таблиці 3.6:

$$\rho_{\text{с.тк}} := \frac{\rho_{\text{с.пов}}}{t_{\text{с.ткан}}} = 1.073 \times 10^3 \quad \psi := \frac{\rho_{\text{с.тк}}}{\rho_{\text{с.г}}} = 0.433$$

За правилом сумішей та формулами сумішей композитних матеріалів знайдемо фізико-механічні властивості елементарних шарів[1;2;13;15]:

а) Фізико-механічні властивості вуглепластику:

Модуль пружності вздовж волокон

$$E_{K1} := (E_{\text{в}}) \cdot \psi + (E_{\text{м}}) \cdot (1 - \psi) = 8.968 \times 10^4 \text{ МПа}$$

Модуль пружності поперек волокон

$$E_{K2} := \frac{(E_{\text{в}}) \cdot (E_{\text{м}})}{\psi \cdot (E_{\text{м}}) + (1 - \psi) \cdot (E_{\text{в}})} = 5.878 \times 10^3 \text{ МПа}$$

Модуль зсуву для волокна

$$(G_{\text{в}}) := \frac{(E_{\text{в}})}{2 \cdot [1 + (\mu_{\text{в}})]} = 8.984 \times 10^4 \text{ МПа}$$

Модуль зсуву для матриці

$$(G_{\text{м}}) := \frac{(E_{\text{м}})}{2 \cdot [1 + (\mu_{\text{м}})]} = 1.363 \times 10^3 \text{ МПа}$$

Модуль зсуву у площині матеріалу

$$(G_{K12}) := \frac{(G_{\text{в}}) \cdot (G_{\text{м}})}{\psi \cdot (G_{\text{м}}) + (1 - \psi) \cdot (G_{\text{в}})} = 2.178 \times 10^3 \text{ МПа}$$

Коефіцієнти Пуассона:

а) при навантаженні вздовж осі x

$$\mu_{K12} := (\mu_B) \cdot \psi + (\mu_M) \cdot (1 - \psi) = 0.323$$

б) при навантаженні вздовж осі z

$$\mu_{K21} := \frac{\mu_{K12} \cdot E_{K2}}{E_{K1}} = 0.021$$

Коефіцієнт лінійно-температурного розширення вздовж волокон

$$\alpha_{K1} := \frac{(E_B) \cdot (\alpha_B) \cdot \psi + (E_M) \cdot (\alpha_M) \cdot (1 - \psi)}{(E_B) \cdot \psi + (E_M) \cdot (1 - \psi)} = 1.156 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

Коефіцієнт лінійно-температурного розширення поперек волокон

$$\alpha_{K2} := (\alpha_B) \cdot \psi + (\alpha_M) \cdot (1 - \psi) = 3.706 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

Максимальна міцність моношару на розтяг, вздовж волокон

$$\sigma_{1,KK} := (\sigma_{1,B}) \cdot \psi + (\sigma_{1,M}) \cdot (1 - \psi) = 1.914 \times 10^3 \text{ МПа}$$

Максимальна міцність моношару на стиск, вздовж волокон

$$\sigma_{2,CC} := (\sigma_{2,S}) \cdot \psi + (\sigma_{1,M}) \cdot (1 - \psi) = 1.116 \times 10^3 \text{ МПа}$$

б) Фізико-механічні властивості для склопластика(S-скло та епоксидна смола)

Модуль пружності вздовж волокон

$$E_{c1} := (E_S) \cdot \psi + (E_M) \cdot (1 - \psi) = 3.908 \times 10^4 \text{ МПа}$$

Модуль пружності поперек волокон

$$E_{c2} := \frac{(E_S) \cdot (E_M)}{\psi \cdot (E_M) + (1 - \psi) \cdot (E_S)} = 6.254 \times 10^3 \text{ МПа}$$

Модуль зсуву для волокна

$$(G_{c,v}) := \frac{(E_S)}{2 \cdot [1 + (\mu_S)]} = 3.525 \times 10^4 \text{ МПа}$$

Модуль зсуву для в матриці

$$(G_{c,m}) := \frac{(E_M)}{2 \cdot [1 + (\mu_M)]} = 1.363 \times 10^3 \text{ МПа}$$

Модуль зсуву у площині матеріалу

$$(G_{c12}) := \frac{(G_{c.v}) \cdot (G_{c.m})}{\psi \cdot (G_{c.m}) + (1 - \psi) \cdot (G_{c.v})} = 2.323 \times 10^3 \text{ МПа}$$

Коефіцієнти Пуассона:

а) при навантаженні вздовж осі 1

$$\mu_{c12} := (\mu_s) \cdot \psi + (\mu_M) \cdot (1 - \psi) = 0.294$$

б) при навантаженні вздовж осі 2

$$\mu_{c21} := \frac{\mu_{c12} \cdot E_{c2}}{E_{c1}} = 0.047$$

Коефіцієнт лінійно-температурного розширення вздовж волокон

$$\alpha_{c1} := \frac{(E_s) \cdot (\alpha_s) \cdot \psi + (E_M) \cdot (\alpha_M) \cdot (1 - \psi)}{(E_s) \cdot \psi + (E_M) \cdot (1 - \psi)} = 8.52 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$$

Коефіцієнт лінійно-температурного розширення поперек волокон

$$\alpha_{c2} := (\alpha_s) \cdot \psi + (\alpha_M) \cdot (1 - \psi) = 3.661 \times 10^{-5}$$

Максимальна міцність моношару на розтяг ,вздовж волокон

$$\sigma_{1.cx} := (\sigma_{1.s}) \cdot \psi + (\sigma_{1.M}) \cdot (1 - \psi) = 1.762 \times 10^3 \text{ МПа}$$

Максимальна міцність моношару на стиск вздовж волокон

$$\sigma_{2.cx} := (\sigma_{2.s}) \cdot \psi + (\sigma_{1.M}) \cdot (1 - \psi) = 1.572 \times 10^3 \text{ МПа}$$

Для визначення границі міцності композита при зсуві (дотичному напруженні) використовують правило сумішей для зсуву (формулу Колінза)[1;13].

$$\tau_{12} = \frac{\tau_m}{1 - V_f \cdot \left(1 - \frac{G_m}{G_f}\right)}$$

Міцність на дотичне напруження для вуглепластику:

$$\tau_{12} := \frac{\tau_m}{1 - \psi \cdot \left[1 - \frac{(G_M)}{(G_B)}\right]} = 86.294 \text{ МПа}$$

Міцність на дотичне напруження для склопластику:

					134.4161.05.ПЗ.03	Лист
						39
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

$$\tau_{12} := \frac{\tau_m}{1 - \psi \cdot \left[1 - \frac{(G_{c.m})}{(G_{c.v})} \right]} = 92.051 \text{ МПа}$$

Пакет та напрям армування волокон за основними напрямками плетіння у таблиці 3.9

Таблиця 3.9 Композиційна структура армування

№ шару	Матеріал		Напрямок армування, град.	Товщина шару
1	S-скло	Twill 2x2	0	0.22мм
2	Вуглеволокно	Twill 2x2	0	0.65мм
3	Вуглеволокно	Twill 2x2	45	0.65мм
4	Вуглеволокно	Twill 2x2	-45	0.65мм
5	Вуглеволокно	Twill 2x2	0	0.65мм
6	S-скло	Twill 2x2	0	0.22мм
Загальна товщина пакету	3.04 мм=0.00304м			

Розрахунок небезпечних перерізів:

Поперечний переріз небезпечних точок А, В, С, розподіленого Навантаження Рис3.3 та ударне навантаження Рис3.4 за схемами зовнішніх навантажень Рис. 3.2 і Рис 3.3 .За цими схемами можна побачити що аеродинамічне навантаження виходить досить малим тому найкращим варіантом для перевірки міцності буде перевірка за ударним навантаженням.

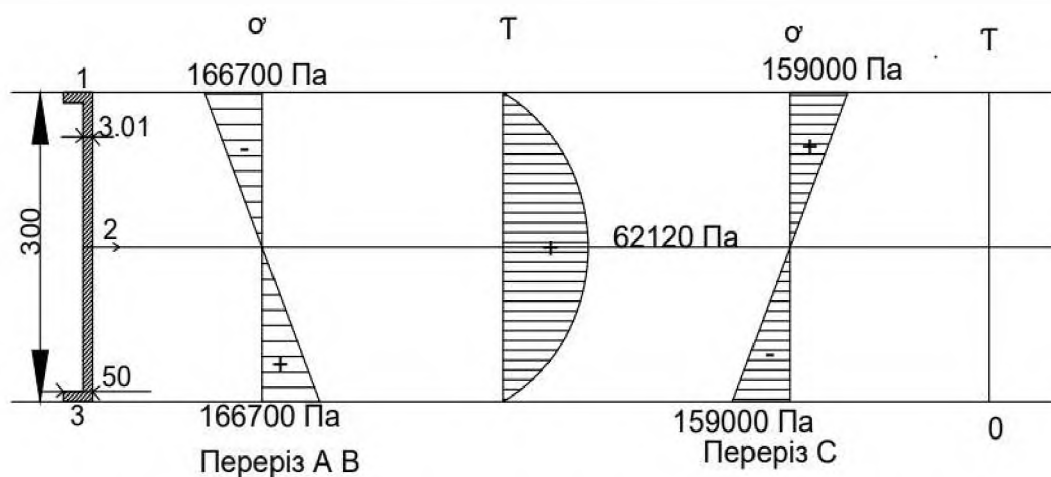


Рисунок 3.3 Схема небезпечних перерізів А, В, С аеродинамічного навантаження.

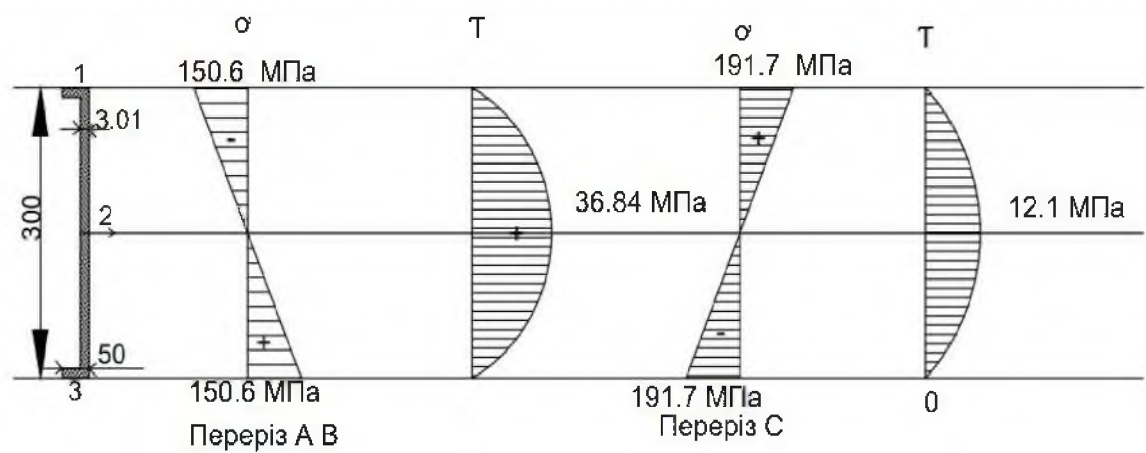


Рисунок 3.4 Схема небезпечних перерізів А,В,С,ударного навантаження.

Розрахунок схем [3] (табл3.8) внутрішніх навантажень небезпечних перерізів А, В, С, Рис3.3 та Рис3.4, за показниками Рис3.1 та Рис 3.2, таблиця 3.6 та за формулами у таблиці 3.10

Таблиця 3.10 Розрахунок навантажень небезпечних перерізів

Показник	Формула	Аеродинамічне навантаження у точках перерізів		Ударне навантаження	
		1 і 3	2	1 і 3	2
Момент інерції I_y м ⁴	$\frac{(0.0034 \cdot 0.3^3)}{12} + 2 \left[\frac{B^3 (K - B)}{12} - B(K - B) \cdot \frac{(H - B)^2}{4} \right]$	1.394*10 ⁻⁵			
Площа поперечного перерізу, S_y , см ³	$S_y := \frac{H}{2} \cdot B \cdot \frac{H}{4}$	92.97			
Момент опору, W_y , см ³	$W_y := \frac{(2 \cdot I_y)}{H}$	92.97			
Навантаження на стиск σ_{min} , МПа	$\frac{(M_{max} \cdot H)}{2 \cdot (I_y)}$	0.167	0.159	150.6	191.7
Навантаження на розтяг σ_{max} , МПа	$\frac{(M_{max} \cdot H)}{2 \cdot (I_y)}$	0.167	0.159	150.6	191.7
Дотичні напруження, τ_{max} , МПа	$\tau_{max} := \frac{(Q \cdot S_y)}{B \cdot I_y}$	0.062	0	36.84	12.1

Аналіз небезпечних перерізів А, В та С показав наявність трьох характерних точок напружень (1, 2, 3). У точок 1 і 3 діють лише нормальні напруження розтягу-стиску (σ), а дотичні напруження відсутні ($\tau = 0$). У точці 2, розташованій на нейтральній осі, навпаки, $\sigma = 0$, а діють максимальні дотичні напруження (τ_{max}). Тому критерій Мізеса-Гілла для точок 1 і 3 переходить у критерій максимальних нормальних напружень, а для точки 2-у критерій максимальних дотичних напружень. Розрахунок показав, що аеродинамічне навантаження створює незначні напруження (Рис 3.3) $\sigma_{max} = 0,167$ МПа, $\tau_{max} = 0,062$ МПа, тоді як ударне навантаження є визначальним $\sigma_{max} = 191,7$ МПа, $\tau_{max} = 36,8$ МПа, тому подальшу перевірку міцності виконано для ударного випадку навантаження.

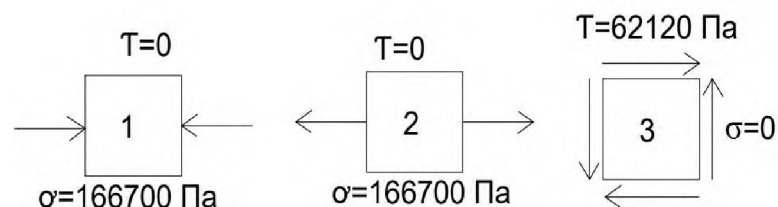


Рисунок 3.3 Навантаження у небезпечних точках поперечного перерізу А, В, С від аеродинамічного навантаження

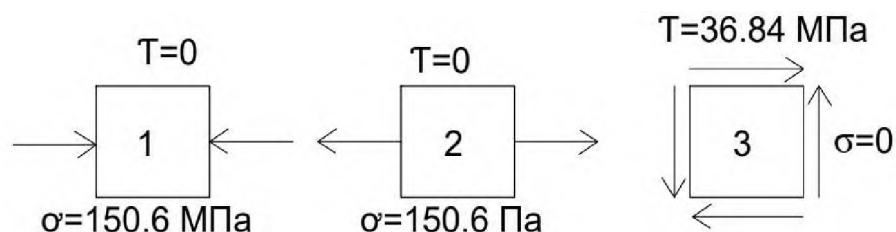


Рисунок 3.4 Навантаження у небезпечних точках поперечного перерізу А, В, С від ударного навантаження

3.3.1 Розрахунок поперечного модуля Юнга та міцності для композитної структури бампера.

Оскільки визначення інтегральних пружних, міцнісних та деформаційних характеристик гібридної структури бампера реалізовано методом послідовних наближень на основі класичної теорії ламінатів[1;2] .Даний підхід дозволяє врахувати прогресуюче

руйнування окремих шарів вугле- та склопластику за різного рівня навантаження. На кожному кроці виконується перерахунок приведеної матриці жорсткості композитного моноліту з урахуванням геометричних параметрів (товщини) та кутів орієнтації волокон кожного діючого шару.

Розрахунок виконується за формулою (3.6). Розрахункові формули можна отримати, враховуючи лише міцність КМ у напрямку армування:

$$F_x^* = \frac{1}{\delta_\Sigma} \sum_{i=1}^4 \delta_i F_{\Sigma} \cos^2 \varphi_i; \quad (3.6)$$

Приведений модуль пружності композитної структури вздовж волокон:

$$E_{x1} := \frac{1}{B} \cdot (E_{c1} \cdot B_s \cdot 1 + E_{k1} \cdot B_B \cdot 1 + E_{k1} \cdot B_B \cdot 0.5 + E_{k1} \cdot B_B \cdot 0.5 + E_{k1} \cdot B_B \cdot 1 + E_{c1} \cdot B_s \cdot 1) = 5.649 \times 10^4 \text{ МПа}$$

Приведений модуль пружності композитної структури поперек волокон:

$$E_{y1} := \frac{1}{B} \cdot (E_{c1} \cdot B_s \cdot 0 + E_{k1} \cdot B_B \cdot 0 + E_{k1} \cdot B_B \cdot 0.5 + E_{k1} \cdot B_B \cdot 0.5 + E_{k1} \cdot B_B \cdot 0 + E_{c1} \cdot B_s \cdot 0) = 1.714 \times 10^4 \text{ МПа}$$

Границя міцності композитної структури на розтяг:

$$\sigma_{1x} := \frac{1}{B} \cdot (\sigma_{1cx} \cdot B_s \cdot 1 + \sigma_{1kx} \cdot B_B \cdot 1 + \sigma_{1kx} \cdot B_B \cdot 0.5 + \sigma_{1kx} \cdot B_B \cdot 0.5 + \sigma_{1kx} \cdot B_B \cdot 1 + \sigma_{1cx} \cdot B_s \cdot 1) = 1.326 \times 10^3 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{1y} := \frac{1}{B} \cdot (\sigma_{1cx} \cdot B_s \cdot 0 + \sigma_{1kx} \cdot B_B \cdot 0 + \sigma_{1kx} \cdot B_B \cdot 0.5 + \sigma_{1kx} \cdot B_B \cdot 0.5 + \sigma_{1kx} \cdot B_B \cdot 0 + \sigma_{1cx} \cdot B_s \cdot 0) = 365.912 \text{ МПа}$$

Границя міцності композитної структури на стиск:

$$\sigma_{2x} := \frac{1}{B} \cdot (\sigma_{2cx} \cdot B_s \cdot 1 + \sigma_{2kx} \cdot B_B \cdot 1 + \sigma_{2kx} \cdot B_B \cdot 0.5 + \sigma_{2kx} \cdot B_B \cdot 0.5 + \sigma_{2kx} \cdot B_B \cdot 1 + \sigma_{2cx} \cdot B_s \cdot 1) = 843.494 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{2y} := \frac{1}{B} \cdot (\sigma_{2cx} \cdot B_s \cdot 0 + \sigma_{2kx} \cdot B_B \cdot 0 + \sigma_{2kx} \cdot B_B \cdot 0.5 + \sigma_{2kx} \cdot B_B \cdot 0.5 + \sigma_{2kx} \cdot B_B \cdot 0 + \sigma_{2cx} \cdot B_s \cdot 0) = 213.353 \text{ МПа}$$

Руйнування шаруватих балок при вигині часто супроводжується їх розшаруванням [1]. Тому міжшарові дотичні напруження, що діють по площині контакту шарів з номерами i та $i+1$ тобто при $y=t_i$ розраховуються за формулою (3.7)

$$\tau_{xy}^{(i, i+1)} = -\frac{Q}{2b_i D} \sum_{j=1}^i E_x^{(j)} b_j (t_j - t_{j-1}) (t_j + t_{j-1} - 2e). \quad (3.7)$$

					134.4161.05.ПЗ.03	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		43

Розрахунок міжшарового зсуву:

$$D := \frac{E_{x1}}{12 \cdot (1 - \mu^2)} = 5.14 \times 10^3$$

$$\tau_{\text{між}} := \frac{Q}{2 \cdot D} \left[E_{c1} \cdot (t1 - 0) \cdot (t1 + 0 - t) + E_{k1} \cdot (t2 - t1) \cdot (t2 + t1 - t) + E_{k1} \cdot (t3 - t2) \cdot (t3 + t2 - t) \right] = -1.317 \times 10^{-3}$$

Розрахунок ваги бампера

Формула ваги[1]:

$$m = \rho \cdot L \cdot b \cdot h \quad (3.8)$$

Розрахунок густини композиту:

$$\rho = \frac{4 \cdot t_B}{t} \rho_{\text{ВП}} + \frac{2 \cdot t_c}{t} \rho_{\text{СП}} = 1898 \text{ кг/м}^3$$

Маса бампера:

$$m_{\text{КМ}} = \rho \cdot S \cdot L = 4,11 \text{ кг}$$

3.3.2 Перевірка міцності та жорсткості бампера

3.3.2.1 Перевірка жорсткості бампера

За пунктом 3.3 та 3.2 було розраховано максимальний прогин який у аеродинамічному навантаженні дорівнює $w_{\text{max}} = 0.001947 \text{ мм}$, при швидкості 120 км/год а через динамічне ударне навантаження $w_{\text{max}} = 4.4 \text{ мм}$, при швидкості 3.3 м/с. Відповідно через різницю швидкостей навантаження не накладаються, тому перевірка буде проводитися за найбільшим прогином тобто ударним навантаженням.

Оскільки точних даних стосовно перевірки жорсткості композитних бамперів в інтернеті не має перевірка жорсткості за критерієм максимальних нормальних напружень буде перевірятися за мінімальним обмеженням стандарту максимального прогину балки[3]

$$f_{\text{fact}} \leq \frac{L}{300}$$

					134.4161.05.ПЗ.03	Лист
						44
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Перевірка:

$$W_{\max 0.89} = \frac{-3.459 \times 10^3}{(5.633 \cdot 10^{10}) \cdot (I_y)} = -4.404 \times 10^{-3} \text{ м}$$

$$w_{\max} = 4.40 \text{ мм} < \frac{L}{300} = 5.93 \text{ мм}$$

Отже, умова жорсткості виконується.

3.3.2.2 Перевірка міцності бампера

Аналіз напружено-деформованого стану, виконаний у підрозділі 3.3, показав просторовий поділ максимальних нормальних напружень $\sigma_{\text{тах}}$ та дотичних напружень $\tau_{\text{тах}}$ у поперечному перерізі бампера. У зв'язку з цим узагальнений критерій Мізеса-Гілла [1] є надлишковим і переходить у критерій максимальних нормальних напружень (Галілея–Ренкіна [3]). Оскільки аеродинамічні навантаження є незначними для небезпечних перерізів А, В, С, подальша перевірка міцності та жорсткості виконується для ударного навантаження за критерієм максимальних нормальних напружень [3].

$$abs \sigma_{1i} \leq F_{1i}; \quad abs \sigma_{2i} \leq F_{2i}; \quad abs \tau_{12i} \leq F_{12i},$$

Згідно з пунктом 3.3 маємо такі дані у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 Перевірка міцності КМ бамперу

Міцність на розтяг вздовж волокон, $\sigma_{1,x}$, МПа	1326
Міцність на стиск вздовж волокон, $\sigma_{1,y}$, МПа	842
Міцність на дотичні навантаження $\tau_{1,2}$, МПа	86.249
Міжшаровий зсув, $\tau_{\text{між}}$ МПа	0.00132
Максимальне навантаження на стиск $\sigma_{\min}$, Мпа	150.6
Максимальне навантаження на розтяг $\sigma_{\max}$, МПа	150.6
Максимальне Дотичне напруження, $\tau_{\max}$, МПа	36.8
Міцність матриці на зсув, $\tau_{\max}$, МПа	54

Для композитних матеріалів які через полімерну матрицю схильні до технологічних дефектів (мікропори, нерівномірність просочення) та до деградації під дією зовнішнього середовища тому за умовами динамічного навантаження закладено коефіцієнт запасу міцності $n=2$ [1;2].

а) Міцність на розтяг:

$$\frac{\sigma_{x1}}{2} = 663 \text{ МПа} > 150.6 \text{ МПа} = \sigma_{max1}$$

Запас міцності

$$\frac{(6.63 \times 10^8)}{1.506 \times 10^8} = 4.402$$

б) Міцність на стиск:

$$\frac{\sigma_{x2}}{2} = 421.7 \text{ МПа} > 150.6 \text{ МПа} = \sigma_{max2}$$

Запас міцності

$$\frac{(843.494 \cdot 10^6)}{1.506 \times 10^8} = 5.601$$

в) Міцність на дотичне напруження

$$\frac{\tau_{12}}{2} = 43.15 \text{ МПа} > 36.84 \text{ МПа} = \tau_{max}$$

Запас міцності

$$\frac{(86.294 \cdot 10^6)}{3.684 \times 10^7} = 2.342$$

г) Міцність на міжшаровий зсув

$$\frac{\tau_m}{2} > \tau_{між} \quad 10.8 \text{ МПа} > 0.013 \text{ МПа}$$

Запас міцності

$$\frac{2.7 \cdot 10^7}{1.317 \cdot 10^3} = 50$$

3.4 Висновок за розділом

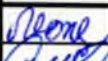
- Аналіз епюр внутрішніх зусиль показав, що при аеродинамічному навантаженні критичними за міцністю є опори А і В ($M_{max}=15,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $Q_{max}=77 \text{ Н}$), а за жорсткістю-центральный переріз С ($w_{max}=3459/EI$, $\theta_{max}=7,26/EI$). При ударному навантаженні максимальні поперечні сили

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

виникають в А і В ($Q_{\max}=45660$ Н), тоді як максимальні згинальний момент, прогин і кут повороту зосереджені в перерізі С ($M_{\max}=17820$ Н·м, $w_{\max}=3459/EIW$, $\theta_{\max}=5812/EI$), який є визначальним як за міцністю, так і за жорсткістю.

2. Аналіз напружень у перерізах А, В, С показав три характерні точки: у 1 і 3 діють лише нормальні напруження, у 2-лише дотичні. Тому критерій Мізеса–Гілла зводиться до критеріїв максимальних нормальних і дотичних напружень. Аеродинамічні напруження є незначними ($\sigma_{\max}=0,167$ МПа, $\tau_{\max}=0,062$ МПа) порівняно з ударними ($\sigma_{\max}=191,7$ МПа, $\tau_{\max}=36,8$ МПа), тому розрахунок виконується для ударного випадку.
3. Знайдено вагу бампера яка у два рази менша за заводський бампер Mitsubishi Pajero - $4.11 \text{ кг} < 7,0 \text{ кг}$.
4. Подальший аналіз враховує отриманий розподіл напружень; температурні впливи незначні. Коефіцієнт запасу на технологічний процес прийнято $n = 2$, умова жорсткості $W_{\max} < L/300$ виконується, що підтверджує працездатність композитної конструкції бампера.

					134.4161.05.ПЗ.03	Лист
						47
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

					134.4161.05.ПЗ			
					Розділ 4			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Студент		Леоненко О.О.						
Керівник		Соломонюк Н.С.						
Н. контр.		Захарова І.О.						
Зав. каф.		Бобров М.М.			НУК			
					Літ.			
					Арк.			
					48			
					Аркушів			

РОЗДІЛ 4 ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА БАМПЕРА

4.1 Вибір технології виробництва КМ

Виріб відповідальний тому для нього не використовується ручне викладання, не використовується намотування тому що виріб не підходить за конструкцією для намотки. Можливі методи формування бамперу розглянуті нижче.

Автоклавне формування

Процес використовується для виробництва деталей, в основному аерокосмічними, морськими та військовими компаніями. Найвища якість (практично «аерокосмічний» рівень). Високий тиск і температура забезпечують щільний, легкий і безпористий матеріал. Використовують препреги (попередньо просочені волокна). Недолік: дуже дорога технологія, складне обладнання [16]. Підходить лише для преміум/автоспортивних деталей, де є доступ до автоклава.

Технологія виробництва представлена на рис. 4.1:

1. Готується пакет композиційного матеріалу (prepreg) на формі.
2. Пакет вакуумується для видалення повітря з нього і просочення смолою арматури.
3. Після цього, підготовлений пакет поміщається в автоклав, де на нього впливають температура і високий тиск.
4. Виріб витримується до затвердіння в автоклаві.
5. Виріб знімається з форми після охолодження.

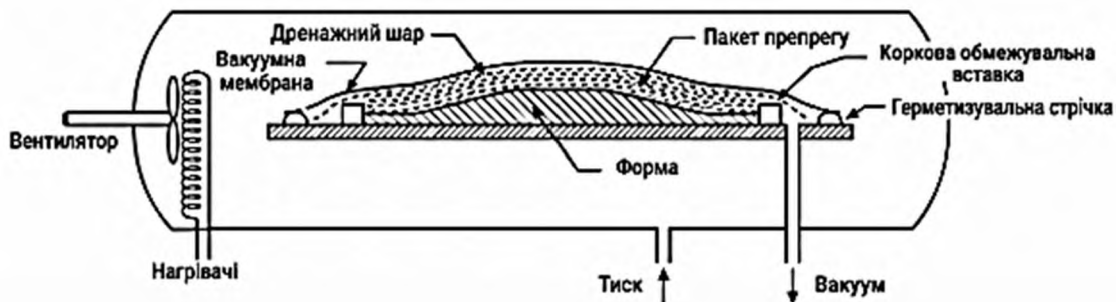


Рисунок 4.1 Схема автоклавного формування

Вакуумна інфузія

Цей процес широко використовується в енергетиці, аерокосмічній, морській, оборонній та інфраструктурній промисловості [13,16]. Сухе волокно (S-скло + карбон) укладається у форму, потім вакуум «затягує» рідку смолу. Порівняно доступна технологія, не потребує автоклава. Якість вища, ніж при ручному ламінуванні. Мінімум повітряних пор, гарна механіка. Потрібні герметична форма, вакуумне обладнання. Рекомендована технологія, якщо немає автоклава. Застосування: Porsche 911 GT3 RS, гоночні модулі, малі виробники.

Технологія виробництва представлена на рис. 3.2.

1. Через вихідний отвір подається вакуум, що втягує смолу під атмосферним тиском, просочуючи арматуру і ущільнюючи виріб.
2. Смола проходить через пористу преформу і проступає у вихідний отвір.
3. Після закінчення інжекції вакуум підтримується доки виріб повністю не затвердіє.
4. Виріб знімається з форми

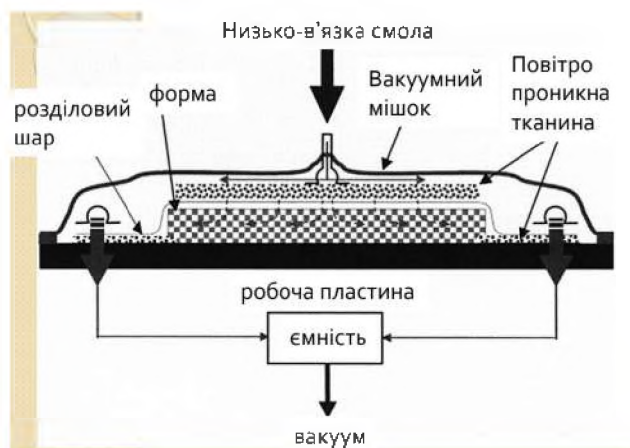


Рисунок 4.2 схема технологічного процесу вакуумна інфузія

Прес-формування (Forged Composites) (рис 4.3)

Використовують рублене волокно або тканину з попередньою просочкою[14,13]. Потрібні жорсткі матриці та прес. Висока швидкість і повторюваність. Часто використовують для Forged Composites (як Lamborghini).

Підходить для серійного виробництва, але складніше реалізувати для гібридних волокон (карбон + S-скло).

Технологія виробництва представлена на рис. 3.3:

I етап,

- Гаряча рідина рухається з боку, який має бути затверділий (виготовлений).
- Холодна рідина циркулює в ділянці, яка тимчасово залишена незатверділою (напівфабрикат) та запобігає «зшиванню» смоли, залишаючи потрібні частини матеріалу незатверділими.

На II етапі неочищені ділянки двох матеріалів, що зазнали аналогічної обробки, з'єднуються в бажаному порядку, а потім повністю тверднуть шляхом застосування циклу твердіння.

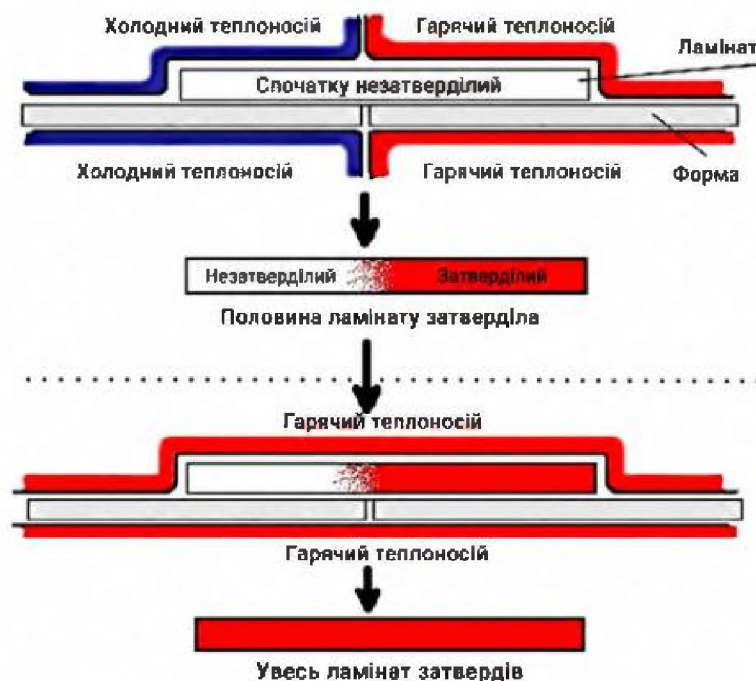


Рисунок 4.3 схема технологічного процесу пресс-формування

Найкращим методом виготовлення композита (вуглеволокно, S-скловолокно, епоксидна смола) є вакуумна інфузія [16]. Вона є оптимальною альтернативою автоклаву та значно якіснішою за ручне ламінування. Завдяки рівномірному вакуумному тиску забезпечується ефективно просочення волокон і зменшення надлишку смоли, що підвищує вміст армування до 65 – 70 % і знижує масу конструкції.

Технологія забезпечує монолітність матеріалу без пор і повітряних включень, що підвищує стійкість до ударних навантажень. Також вона дозволяє точно формувати складну геометрію деталей і забезпечує високу повторюваність та стабільність розмірів. Таким чином, вакуумна інфузія є ключовою технологією для реалізації високих міцнісних характеристик композитного бампера.

4.2 Матеріали, що використовуються при виготовленні бамперу

Для виготовлення бамперу автомобіля використовуються наступні матеріали:

Основні матеріали

- Вуглеволокно T700S Twill(Саржеве плетіння) [10]
- Скловолокно HT CASW220B-90a (Саржеве плетіння) [11]
- Епоксидна смола Sikomin SR 1710 Injection [9]
- Затверджувач (МЕК) Sikomin SD 882х
- Епоксидний гелькоут SG 715 у комплекті з затверджувачем SD 7820.

Допоміжні матеріали:

- Аерозольний епоксидний фіксатор Sicomin ISOTACKER
- Жертовна тканина
- Роздільна перфорована плівка
- Провідна сітка для смоли
- Спіральні трубки для подачі смоли та вакууму
- Вакуумна плівка
- Герметизуючий джгут/стрічка
- Пастка для смоли

Епоксидна смола Sikomin SR 1710 призначена для вакуумної інфузії або Resin Transfer Moulding. Фізико-механічні властивості [9] приведені у таблицю 4.1.

Технологічні характеристики армуючих матеріалів та сполучника представлені в таблиці 4.2

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

Таблиця 4.1 Характеристики сполучника

Характеристика	Величина	Розмірність
Густина	1.10 -1.12	г/см ³
В'язкість при 20°C	260-320	МПа·с
Вміст стиролу	0	%
Макс робоча температура	100	°C

Таблиця 4.2 Властивості армуючих матеріалів

Тип	Поверхнева щільність, г/м ²	Товщина, мм	Густина г/см ³
T700S Twill	400	0,065	1.80
HT CASW220B-90a Twill	236	0.022	2.48

Технологічний пакет складається з шарів наведених у в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 Технологічний пакет композиційного матеріалу для бамперу

Матеріал	Подовження %	Товщина мм	Температура експлуатації, °C	Поверхнева щільність, г/м ²
Епоксидний гелькоут) SG 715 /SD 7820.	4	0.7	До 120	600
Жертовний шар (Peel Ply)Airtech Econoply ЕПолиестер (Polyester)	30	0.15	До 204	85
Роздільна плівка (перфорована)Airtech Wrightlon 5200	300	0.025	До 121	31
Провідна сітка (інфузійна) Airtech Greenflow 75)	25	0.90	До 121	140
Вакуумний мішок (плівка) Airtech Wrightlon 5400	400	0.050	До 121	55

Розрахунок кількості сполучника та гелькоуту [9]

SD 8823 (Середній/Стандартний) - універсальний вибір для більшості конструкцій середнього розміру. Пропорція змішування: 100 : 28 за масою (на 100 г смоли - 28 г затверджувача). Час життя суміші ~1 година 40 хвилин при 20 °С. Вміст волокна в матеріалах: у склотканини – 43 %, у вуглетканини – 38 %. Відповідно, вміст смоли: у склотканини – 57 %, у вуглетканини – 62 %. У пакеті армування склотканина займає 20%, а вуглетканина - 80% від загальної маси. Звідси середній вміст смоли в деталі:

$$(0,20 \times 57\%) + (0,80 \times 62\%) = 11,4\% + 49,6\% = 59\%$$

Тобто смола становить приблизно 59% від загальної маси деталі, а волокно - 41%. Отже необхідна маса смоли 1.7 л (1.8 кг)

Для надійності готується 2 л (2.2 кг) смоли - цього вистачить і на просочення, і на заповнення шлангів та інфузійної системи.

Площа деталі - 0,7 м², товщина гелькоуту - 0,7 мм, густина суміші – 1,15 г/см³.

Розрахункова маса гелькоуту для покриття поверхні площею 7000 см² шаром завтовшки 0,07 см становить 565 г.

З урахуванням технологічного запасу та втрат у процесі нанесення для виготовлення виробу приймається 800 г гелькоуту. Підсумкова кількість матеріалів представлена у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 Підсумкова вага матеріалів

Матеріал	Кількість	Пропорція(за вагою)
Гелькоут SG 715	800 г	100
Затверджувач SD 7820	184 г	23
Смола SR 1710 Injection	3000 г	100
Затверджувач SD 8823	840 г	28

4.3 Технологія виробництва пластини бамперу

Підготовка матриці

Перед початком робіт матриця витримується при температурі 20 ± 3 °С. Поверхня очищається безворсовими серветками від пилу та забруднень. Далі наноситься розділювальний шар: 3 шари воскового розділювача з витримкою 15 хв між нанесеннями та поліруванням після кожного шару. Після цього наноситься PVA-розділювач (2 шари з витримкою 20 хв), що забезпечує надійне відокремлення деталі від матриці [16]. Перед нанесенням гелькоуту витримка становить не менше 45 хв.

Нанесення гелькоуту

Використовується гелькоут SG 715 із затверджувачем SD 7820 у пропорції 100:23 за масою. Суміш гомогенізується 3-5 хв при низьких обертах. Нанесення виконується пневморозпиленням у два шари товщиною 0,4 - 0,5 мм кожен (загальна товщина 0,6–0,8 мм). При 20 °С стан «tack-free» досягається приблизно за 4 години, після чого виконується укладання армування [9,16].

Укладання армувальних шарів

Тканина має бути висушеною та вирівняною. Площа армування становить приблизно 0,7 м². Використовується пакет армування (табл. 4.5) із загальною масою сухого армування близько 1600 г. Фіксація шарів здійснюється легким клей-спреем Sicomin ISOTACKER для запобігання зміщенню волокон [16].

Таблиця 4.5 Порядок викладення армувальних шарів

Шар	Матеріал	Орієнтація	Поверхнева густина, г/м ²	Маса на 0,7 м ²
1	Склотканина	0°	236	165 г
2	Вуглетканина	0°	400	280г
3	Вуглетканина	45°	400	280г
4	Вуглетканина	45°	400	280г
5	Вуглетканина	0°	400	280г
6	Склотканина	0°	236	165г

Монтаж дренажної та інфузійної системи

- Поверх укладеного армування монтує допоміжну систему:
- Жертовний (дренажний) шар - суцільним покриттям по всій поверхні, щоб смола рівномірно розходилася;
- Інфузійну сітку - смугами вздовж деталі з кроком приблизно 0,5 м;
- Спіральну трубку по периметру матриці - це вакуумна лінія для відбору повітря;
- Центральну трубку подачі смоли - вздовж осі бампера.

Герметизація вакуумного пакета

Контур герметизується бутиловим герметиком, після чого встановлюється вакуумна плівка з формуванням вільного провисання. Система підключається через штуцери до вакуумної магістралі. Вакуумування виконується до тиску – 0,8...–0,95 bar з витримкою 10–15 хв. Допустиме падіння тиску - не більше 0,02 bar [16].

Приготування смоли Sikomin SR 1710 Injection

Смола SR 1710 Injection змішується із затверджувачем SD 8823 у пропорції 100:28 (3000 г смоли + 840 г затверджувача). Суміш перемішується 2–3 хв до однорідного стану. Життєздатність при 20 ± 3 °C становить близько 25 хв [9].

Інфузія смоли

Після стабілізації вакууму смола подається у систему та заповнює армування під дією перепаду тиску. Процес контролюється візуально через плівку. Подача перекривається після досягнення фронтом смоли краю деталі.

Таблиця 4.6 Відношення відстані до хвилин за які вона пройде цю відстань.

Ділянка	Відстань	Швидкість	Час
0–3 см	3 см	5 см/хв	0,6 хв
3–6 см	3 см	4 см/хв	0,75 хв
6–9 см	3 см	3 см/хв	1,0 хв
9–12 см	3 см	1,5 см/хв	2,0 хв
12–15 см	3 см	0,5 см/хв	6,0 хв
Разом	15 см		≈ 10,5 хвилин

Контролюється фронт просочування візуально крізь прозору вакуумну плівку. Як тільки смола досягає краю деталі та з'являється в периметральній зоні (десь 5–10 см від краю інфузійної сітки) - перекривається подача, щоб уникнути надлишкового накопичення смоли.

Полімеризація

Після завершення інфузії деталь залишається під вакуумом для первинного твердіння. При температурі $20 \pm 3^\circ\text{C}$ витримую не менше 12 годин.

10. Термічна обробка (пост-отвердіння)

Після первинного твердіння виконую пост-отвердіння. Режим для смоли та гелькоуту однаковий - 12 годин при температурі 60°C [9].

Після завершення термообробки даю деталі охолонути в матриці до кімнатної температури. Потім знімаю її з матриці та проводжу фінальну обробку: обрізаю технологічні припуски, шліфую поверхню, свердлю отвори під кріплення[14].

Схеми технологічного процесу.

Схеми технологічного процесу представлені на рис.4.5 і рис.4.6.

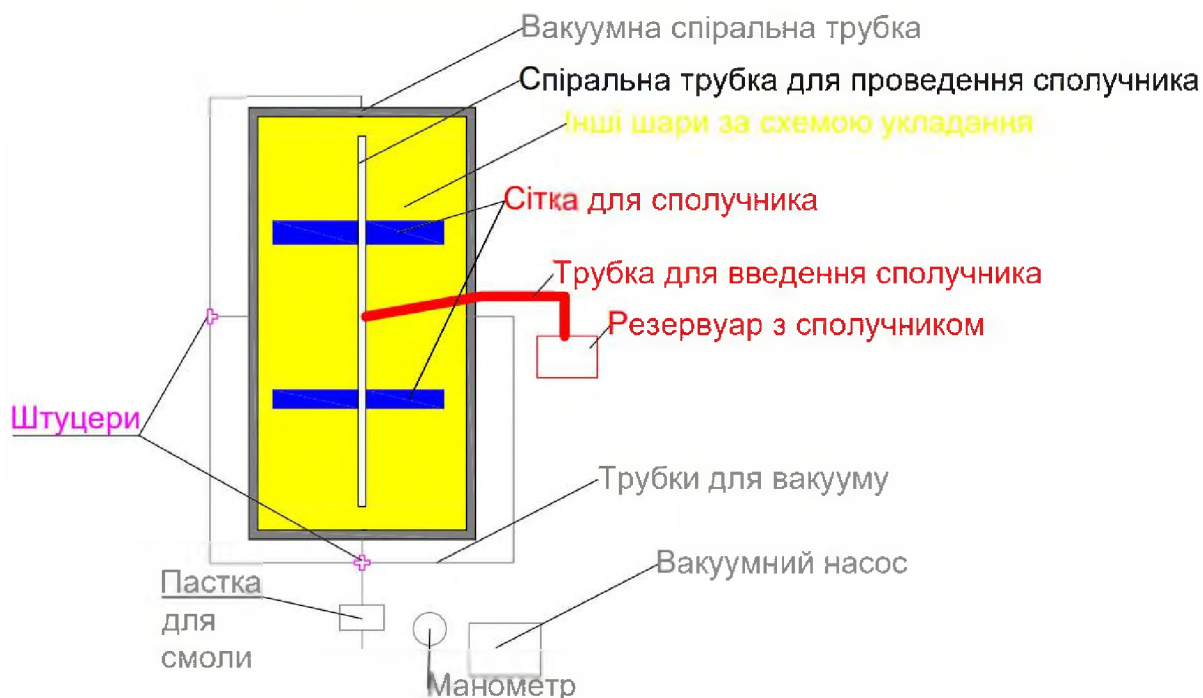


Рисунок 4.5 Схема технологічного процесу у розрізі

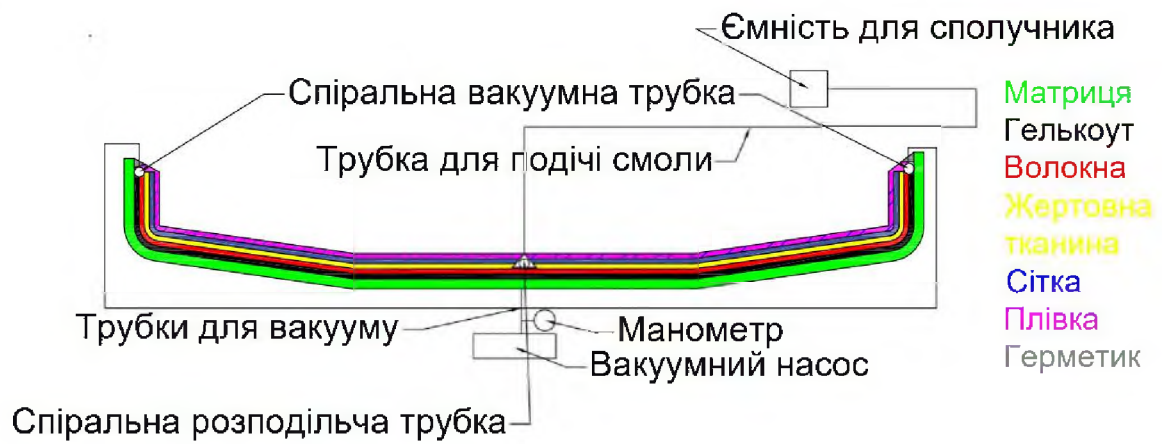


Рисунок 4.6 Схема технологічного процесу зверху

Графік робіт приведенний у таблиця 4.7

Таблиця 4.7 Графік робіт

Етап	Тривалість
Підготовка матриці	2 год
Нанесення гелькоуту	30 хв
Очікування "tack-free"	4 год
Укладання армування	2 год
Монтаж інфузійної системи	1 год
Вакуум-тест	30 хв
Приготування смоли	20 хв
Інфузія смоли	15 хв
Первинне твердіння	12 год
Пост-отвердіння	12 год
Охолодження	3 год
Демонтаж деталі	30 хв

Контроль якості

Після Пост-отвердіння потрібно провести контроль якості буде проводитись по загальному вигляду та за допомогою ультразвукового обладнання. За допомогою цього обладнання можна побачити пористість, розшарування, непроклей, сторонні включення.

- Ультразвуковий датчик (п'єзоперетворювач) випромінює короткі імпульси в матеріал.
- Хвиля проходить через товщу композиту, відбивається від донної поверхні та повертається назад.
- Дефект (пора, розшарування) також відбиває хвилю - і повертається сигнал швидше, ніж від дна.
- За часом повернення сигналу я визначаю, на якій глибині знаходиться дефект. За допомогою УД 2Н-ПМ, УСД-60 або Sonatest VEO, фазову решітку та скануючу систему.

16 Фінішна обробка деталі

У фінішну обробку деталі йде її підрізка по розмірам або відрізання усього зайвого, шліфування внутрішньої частини бампера, та покриття гелем з кісточки у точно таких же пропорціях змішування.

4.3 Висновки за розділом

1. Найкращим методом виготовлення композита (вуглеволокно, S-скловолокно, епоксидна смола) є вакуумна інфузія [16]. Вона є оптимальною альтернативою автоклаву та значно якіснішою за ручне ламінування. Завдяки рівномірному вакуумному тиску забезпечується ефективне просочення волокон і зменшення надлишку смоли, що підвищує вміст армування до 65–70% і знижує масу конструкції.
2. Схема технологічного процесу укладена таким чином щоб смола під час інфузії проходила найменший відрізок відстані а саме 40 сантиметрів. Завдяки спіральній трубці по периметру бампера, тиск буде по всій площі бампера, та завдяки одній трубці проведення смоли, сполучник пройде всю відстань за найменший час.
3. Контроль якості допоможе визначити дефекти якщо вони будуть, та фінішна обробка для готової експлуатації деталі.

ВИСНОВКИ

1. У ході виконання роботи проведено комплексний аналіз призначення, умов експлуатації та конструктивних особливостей переднього бампера автомобіля. Встановлено, що бампер повинен одночасно забезпечувати високу жорсткість і вібростійкість, достатню ударну міцність та енергопоглинання, мінімальну питому масу, а також стабільність властивостей у широкому температурному діапазоні та стійкість до агресивних середовищ.

2. Обґрунтовано доцільність використання гібридного композиту на основі вуглеволокна, S-скловолокна та епоксидної матриці з захисним гелькоутом. Таке поєднання дозволяє досягти раціонального балансу між жорсткістю, ударостійкістю та малою масою конструкції.

3. Обґрунтовано вибір структури КМ та визначено раціональне армування з урахуванням статичних і динамічних навантажень, виконано аналіз напружено-деформованого стану бампера.

4. Результати розрахунків показали, що при аеродинамічному навантаженні критичними є опорні перерізи за міцністю та центральний переріз за жорсткістю. При ударному навантаженні визначальним є центральний переріз, у якому виникають максимальні згинальні моменти, прогини та кути повороту, що робить його критичним як за міцністю, так і за жорсткістю. Аеродинамічні напруження є незначними порівняно з ударними, тому саме ударний випадок є розрахунково визначальним.

5. Додатково встановлено, що маса розробленої конструкції становить 1,9 кг, що майже у 2 рази менше за масу серійного бампера Mitsubishi Pajero (4,2 кг), що підтверджує ефективність обраного матеріального рішення.

6. Обґрунтовано вибір технології виготовлення-вакуумної інфузії, яка забезпечує високу якість просочення, мінімальну пористість, високий вміст армування (65 – 70%) та стабільні механічні характеристики при зниженій масі виробу. Раціональна організація інфузійної схеми забезпечує рівномірний розподіл смоли та скорочення шляху її проходження, що підвищує технологічну ефективність процесу.

					134.4161.05.ПЗ.00	Лист
						60
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Результати дослідження підтверджують доцільність застосування гібридних композитів та вакуумної інфузії для виготовлення сучасних автомобільних елементів конструкції.

					134.4161.05.ПЗ.00	Лист
						61
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Карпов Я. С. Проектування деталей та агрегатів із композитів: підручник-Харків: Нац. аерокосмічний університет «ХАІ», 2010.-768 с.
2. Карпов Я. С. Проектування і конструювання виробів з композиційних матеріалів. Теорія і практика: підручник.-Харків: Нац. аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», 2015.-672 с.
3. Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Е. С. Опір матеріалів: підручник / за ред. Г. С. Писаренка.- Київ: Вища школа, 2004.-655 с.
4. Ашкеназі Є. К., Ганов Е. В. Анізотропія конструкційних матеріалів.-Київ: Наукова думка, 2005.-384 с.
5. Гайдачук В. Є., Карпов Я. С. Основи проектування конструкцій з композиційних матеріалів.-Харків: ХАІ, 2007.-240 с.
6. ДСТУ ISO 6603-2:2018. Пластмаси. Визначення ударних характеристик жорстких пластмас.-Київ: УкрНДНЦ, 2018.-20 с.
7. ДСТУ EN ISO 527-4:2022. Пластмаси. Визначення механічних властивостей при розтягу. Частина 4. Композити, армовані волокном.-Київ: УкрНДНЦ, 2022.-28 с.
8. ДСТУ EN ISO 14125:2019. Композитні матеріали. Визначення властивостей при згині.-Київ: УкрНДНЦ, 2019.-24 с.
9. Sicomin. SR 1710 EVO / SD 882x Structural Epoxy System. Technical Data Sheet.- Châteauneuf-les-Martigues: Sicomin, 2024.-12 p.
10. Toray Industries. T700S Carbon Fiber Technical Data Sheet.-Tokyo: Toray Industries, 2024.-18 p.
11. HT Glass. S-Glass Fabric CASW220B-90a Technical Data Sheet.-Taiwan: HT Glass Composite Materials, 2024.-10 p.
12. Hucho W.-H. Aerodynamics of Road Vehicles.-Warrendale: SAE International, 2013.-976 p.
13. Mallick P. K. Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design.-Boca Raton: CRC Press, 2007.-640 p.

					134.4161.05.ПЗ.00	Лист
						62
Изм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

14. Gay D. Composite Materials: Design and Applications.-Boca Raton: CRC Press, 2014.-624 p.
15. Hull D., Clyne T. W. An Introduction to Composite Materials.-Cambridge: Cambridge University Press, 1996.-326 p.
16. Гейко С. П., Бурдун Є. Т. Технологія виготовлення суднових конструкцій із полімерних композиційних матеріалів.-Миколаїв: НУК ім. адм. Макарова, 2011.- 280 с.
17. UNECE Regulation No. 42. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to their front and rear protective devices (bumpers).-Geneva: United Nations Economic Commission for Europe, 1980.-85 p.

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