

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

«Проектування заднього автомобільного спойлера зі скло волоконного композиту»

Рівень вищої освіти перший бакалаврський
Галузь знань 13 Механічна інженерія
Спеціальність 132 Матеріалознавство
Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

Шифр КвРМТВА. 22098.01.22.00

Виконав студент 4 курсу група МТВА-22-1


Підпис

Андрій ПОГУРАЛО

Керівник к.т.н., доцент каф. ТАМ


Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

Нормоконтролер к.т.н., доцент каф. ТАМ


Підпис

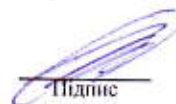
Олег БАБАК

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри ТАМ

11.06.2026р

Дата


Підпис

Олександр ДИХА

Хмельницький, 2026

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства
Рівень вищої освіти перший бакалаврський
Галузь знань 13 Механічна інженерія
Спеціальність 132 Матеріалознавство
Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ


15.04 Диха О.В.
2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Погуралу Андрію Михайловичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: *Проектування заднього автомобільного спойлера зі скловолоконного композиту.*

керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 20.01.2026 р. № 7 (Д 14)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 16.06.2026 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Матеріали курсових проектів, робіт, практики.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

- 1) *Особливості заднього спойлера автомобіля.*
- 2) *Техпроцес виготовлення спойлера автомобіля*
- 3) *Проектування автомобільного спойлера.*
- 4) *Висновки, рекомендації*

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 15.04 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	Особливості заднього спойлера автомобіля	14.04.26	вик
2	Техпроцес виготовлення спойлера автомобіля	16.05.26	вик
3	Проектування автомобільного спойлера	26.05.26	вик
4	Висновки, рекомендації	10.06.26	вик
5	Оформлення пояснювальної записки	12.06.26	вик
6	Допуск до захисту	14.06.26	вик
7	Захист дипломної роботи	16.06.26	

Студент


Підпис

Андрій ПОГУРАЛО

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

«Проект
компо
викори
сторін
сторін
і 7 таб.

встано
додатк
дорож
сучасн
міцних
констр

вигото
оцінює

спойле
сучасн
аероди
швидк
максим
були
скінче

виробу
сендві
експлу
дало з
констр

КОМП
ПРИТ

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВА-22-1 Погурало Андрій Михайлович.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему *«Проектування заднього автомобільного спойлера зі скло волоконного композиту»* складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 12 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 1 додатку розміщеного на 12 сторінках. Роботу викладено на 59 сторінках, з них 51 сторінка основного тексту, на яких розміщено 15 рисунків і 7 таблиць.

Ефективним засобом впливу на аеродинамічні характеристики є встановлення заднього спойлера. Такий елемент сприяє створенню додаткової притискної сили, яка забезпечує краще зчеплення коліс із дорожнім покриттям та стабільність руху транспортного засобу. Водночас сучасні тенденції в машинобудуванні передбачають використання легких і міцних матеріалів, зокрема композиційних, що дозволяє зменшити масу конструкції без втрати її експлуатаційних властивостей.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження процесів проектування та виготовлення композитних аеродинамічних елементів кузова, а також оцінювання їхньої ефективності в реальних умовах навантаження.

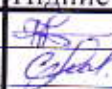


У даній роботі виконано проектування заднього автомобільного спойлера з композитного матеріалу на основі скловолокна з використанням сучасних систем автоматизованого проектування. Розрахунки аеродинамічних параметрів проведено з урахуванням кута атаки 8° та швидкості повітряного потоку 150 км/год, що дозволило визначити максимальну притискну силу, яка діє на конструкцію. Отримані значення були використані для подальшого числового аналізу міцності методом скінченних елементів і визначення напружень та переміщень у спойлері.

Також у роботі запропоновано технологічний процес виготовлення виробу методом вакуумної інфузії та обґрунтовано конструктивні параметри сендвіч-ламінату, що забезпечують необхідну жорсткість і надійність при експлуатації. Проведене моделювання для різних значень притискної сили дало змогу встановити закономірності зміни напруженого стану композитної конструкції залежно від швидкості повітряного потоку та перепаду тиску.

Ключові слова: СПОЙЛЕР, АЕРОДИНАМІКА, СКЛОВОЛОКНО, КОМПОЗИТ, МОДЕЛЮВАННЯ, НАПРУЖЕНО ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, ПРИТИСКНА СИЛА.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ОСОБЛИВОСТІ ЗАДНЬОГО СПОЙЛЕРА АВТОМОБІЛЯ	7
1.1 Конструктивні аспекти спойлерів.	7
1.2 Рухомий спойлер.	9
1.3 Вибір профілю аеродинамічного та основні вимоги.	14
1.4 Теоретичні основи поняття лобового опору.	17
1.5 Теоретичні основи поняття притискної сили.	19
1.6 Теоретичні основи поняття турбулентних і ламінарних потоків.	20
1.7 Числа Маха і Рейнольдса.	21
2 ТЕХПРОЦЕС ВИГОТОВЛЕННЯ СПОЙЛЕРА АВТОМОБІЛЯ	24
2.1 Вибір матеріалів.	24
2.2 Виробничі методи формування композитів.	32
3. ПРОЄКТУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНОГО СПОЙЛЕРА	37
3.1 Розробка продукту для проектування.	37
3.2 Геометричні параметри спойлера.	40
3.3 Технологія виготовлення.	45
3.4 Визначення притискної сили спойлера.	48
3.5 Аналіз НДС спойлера МКЕ.	50
ВИСНОВКИ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57
ДОДАТКИ	59

КВРМТВА. 22098.01.22.00					
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата	
Виконав		Погурало			Проектування заднього автомобільного спойлера зі скловолоконного композиту
Перевір.		Посонський			
Н.контр.		Бабак			Літера
Затвер.		Диха			Арквш
					Арквшів
					4
					59
					ХНУ, МТВА-22-1

ВСТУП

Сучасний розвиток автомобілебудування характеризується підвищеними вимогами до енергоефективності, безпеки руху та динамічних характеристик транспортних засобів. Одним із важливих напрямів удосконалення конструкції автомобіля є оптимізація його аеродинамічних властивостей. Зменшення аеродинамічного опору та одночасне формування необхідної притискної сили дозволяє покращити керуваність автомобіля на високих швидкостях, підвищити його стійкість і знизити витрати палива.

Ефективним засобом впливу на аеродинамічні характеристики є встановлення заднього спойлера. Такий елемент сприяє створенню додаткової притискної сили, яка забезпечує краще зчеплення коліс із дорожнім покриттям та стабільність руху транспортного засобу. Водночас сучасні тенденції в машинобудуванні передбачають використання легких і міцних матеріалів, зокрема композиційних, що дозволяє зменшити масу конструкції без втрати її експлуатаційних властивостей.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження процесів проектування та виготовлення композитних аеродинамічних елементів кузова, а також оцінювання їхньої ефективності в реальних умовах навантаження. Особливу увагу необхідно приділяти визначенню притискної сили, аналізу напружено-деформованого стану конструкції та вибору оптимальної технології виробництва.

У даній роботі виконано проектування заднього автомобільного спойлера з композитного матеріалу на основі скловолокна з використанням сучасних систем автоматизованого проектування. Розрахунки аеродинамічних параметрів проведено з урахуванням кута атаки 8° та швидкості повітряного потоку 150 км/год, що дозволило визначити максимальну притискну силу, яка діє на конструкцію. Отримані значення

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

були використані для подальшого числового аналізу міцності методом скінченних елементів і визначення напружень та переміщень у спойлері.

Також у роботі запропоновано технологічний процес виготовлення виробу методом вакуумної інфузії та обґрунтовано конструктивні параметри сендвіч-ламінату, що забезпечують необхідну жорсткість і надійність при експлуатації. Проведене моделювання для різних значень притискної сили дало змогу встановити закономірності зміни напруженого стану композитної конструкції залежно від швидкості повітряного потоку та перепаду тиску.

Метою роботи є проектування композитного заднього спойлера автомобіля та аналіз його аеродинамічної і міцнісної ефективності.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

- 1) Аналіз геометричних параметрів і функціонального призначення заднього спойлера.
- 2) Визначення притискної сили та оцінювання аеродинамічних характеристик.
- 3) Розроблення технології виготовлення композитного спойлера.
- 4) Проведення числового аналізу напружено-деформованого стану конструкції методом скінченних елементів.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОСОБЛИВОСТІ ЗАДНЬОГО СПОЙЛЕРА АВТОМОБІЛЯ

1.1 Конструктивні аспекти спойлерів.

Спойлер – це елемент аеродинамічної форми, подібний до крила, який встановлюється на автомобілях для зміни напрямку повітряного потоку. Його головне завдання полягає у створенні додаткової притискної сили, що покращує зчеплення шин із дорожнім покриттям під час руху на високих швидкостях. Завдяки цьому зменшується підйомна сила та підвищується стійкість автомобіля.

Опір повітря – це сила, що діє проти напрямку руху транспортного засобу і фактично «гальмує» його. Підйомна сила, навпаки, спрямована вгору і виникає внаслідок руху повітря під кузовом, через що передні колеса можуть частково втрачати контакт із дорогою при збільшенні швидкості [1].

Спойлери широко застосовуються на гоночних та спортивних автомобілях із високими динамічними характеристиками, однак сьогодні їх часто встановлюють і на звичайні легкові авто. У деяких випадках вони виконують переважно декоративну функцію та можуть мати незначний вплив на аеродинаміку або навіть погіршувати її.

Основне призначення спойлера – змінювати характер обтікання кузова повітряним потоком. Це досягається за рахунок створення турбулентності, яка порушує ламінарний потік і сприяє формуванню притискної сили. Водночас надмірна турбулентність може збільшувати аеродинамічний опір, що здатне зменшувати швидкість автомобіля.

Притискна сила утворюється завдяки різниці швидкостей повітряних потоків, що проходять над і під аеродинамічним профілем спойлера. Це призводить до різниці тиску, яка «притискає» автомобіль до дороги.

Якщо розглядати автомобіль без спойлера, то зі збільшенням швидкості зростає і сила опору повітря. Для її подолання двигун змушений

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

виробляти більше потужності, що веде до підвищеної витрати пального. Крім того, на великих швидкостях автомобіль стає менш стійким, що ускладнює гальмування та проходження поворотів.

Саме тому встановлення заднього спойлера допомагає підвищити притискну силу, зменшити негативний вплив лобового опору та покращити керуваність і стабільність транспортного засобу.

Задній спойлер має конструкцію з поступовим зменшенням товщини до задньої (хвостової) кромки, що впливає на характер обтікання його повітряним потоком. Така форма змінює траєкторію руху повітряних частинок і сприяє підвищенню стійкості автомобіля під час руху. Це відбувається завдяки виникненню притискної сили – вертикально спрямованої сили, яка збільшує силу зчеплення шин із дорожнім покриттям.

Як показано на правій частині рисунка 1.1, повітряний потік, зустрічаючи задній спойлер, змушений змінювати напрям руху. Унаслідок цього відбувається накопичення та прискорення повітряних частинок у зоні біля кришки багажника, що призводить до формування додаткового тиску і, відповідно, створення притискної сили.



Рисунок 1.1 – Траєкторія обтікання повітря без та з спойлером.

На рисунку 1.2 наведено поперечний переріз крила з відображенням руху повітря навколо нього. Спойлер має форму аеродинамічного профілю, яка забезпечує ефективну циркуляцію повітряного потоку. Завдяки геометрії профілю швидкість руху повітря на нижній поверхні є більшою, ніж на

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

верхній, що спричиняє різницю тиску. Саме ця різниця створює силу, яка притискає автомобіль до дороги та покращує його керуваність.

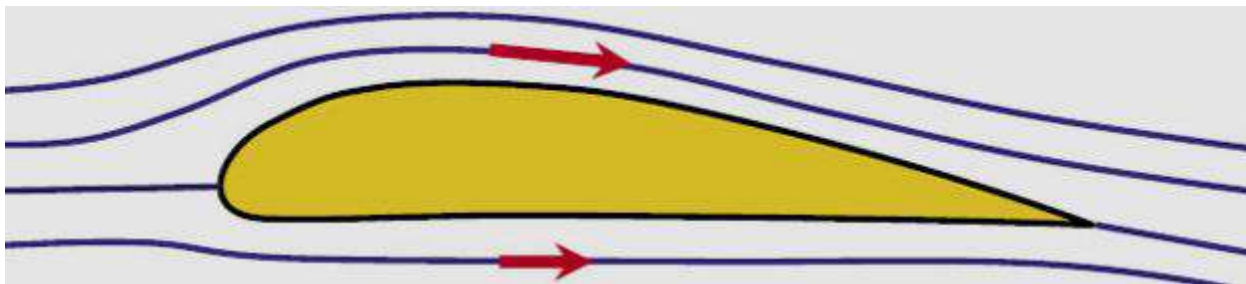


Рисунок 1.2 – Форма перерізу крила [2].

Таким чином, аеродинамічний профіль є ключовим конструктивним елементом спойлера. Його вигнуті поверхні розробляються з урахуванням досягнення оптимального співвідношення між притисною силою та аеродинамічним опором. Крім того, важливу роль відіграє процес відведення або «всмоктування» повітряного потоку, що рухається вздовж кузова, який сприяє додатковому притисканню шин до дорожнього покриття.

Поперечний переріз крила наочно демонструє виникнення різниці тиску, що формується внаслідок руху повітряних частинок навколо аеродинамічного профілю.

1.2 Рухомий спойлер.

Застосування рухомих (автоматичних) спойлерів є ефективним рішенням у сучасних транспортних засобах, оскільки більшість традиційних спойлерів працюють у фіксованому положенні та розраховані на певний режим обтікання повітря. У реальних умовах руху напрямок повітряного потоку та динаміка автомобіля постійно змінюються, тому нерухомий спойлер не завжди забезпечує оптимальну аеродинамічну ефективність. Наприклад, під час різких поворотів або зміни швидкості він може менш

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

ефективно виконувати свою функцію, ніж під час руху по прямій. Саме тому використання автоматично керованого спойлера дозволяє адаптувати його положення до поточних умов руху.

Аеродинамічні профілі спойлерів мають форму, подібну до крила, із заокругленою передньою кромкою та поступовою зміною товщини до задньої кромки. Така геометрія сприяє формуванню різниці тиску, оскільки повітряні потоки рухаються з різною швидкістю по верхній і нижній поверхнях. Зазвичай швидкість потоку на нижній частині профілю є більшою, що призводить до зменшення часу проходження повітряних частинок та виникнення перепаду тиску. У результаті формується притискна сила, яка покращує зчеплення шин із дорожнім покриттям і підвищує стійкість автомобіля під час руху.

В автоматичному спойлері передбачена можливість зміни його положення та кута атаки. Це досягається шляхом збільшення висоти встановлення елемента, використання додаткових кронштейнів і шарнірних механізмів, що забезпечують висування або втягування конструкції. Завдяки цьому спойлер може працювати в різних режимах, оптимізуючи аеродинамічні характеристики транспортного засобу.

Конструктивно автоматизований задній спойлер складається щонайменше з одного аеродинамічного профілю з подовженими передньою та задньою кромками, що сприяє ефективному формуванню повітряного потоку. Для зміни положення профілю застосовуються приводи лінійного типу, які забезпечують його переміщення у кількох фіксованих або безперервно регульованих положеннях.

Система керування спойлером може бути пов'язана з гальмівною системою автомобіля та іншими датчиками, що відстежують параметри руху, зокрема швидкість, прискорення або положення керма. Керування може здійснюватися як автоматично, так і вручну водієм.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 1.3 зображено поперечний переріз аеродинамічного профілю спойлера із зазначенням кута атаки. Форма крила змінюється вздовж його довжини або радіуса, що дозволяє ефективно використовувати різницю швидкостей повітряних потоків над верхньою та нижньою поверхнями для створення необхідної притискної сили.

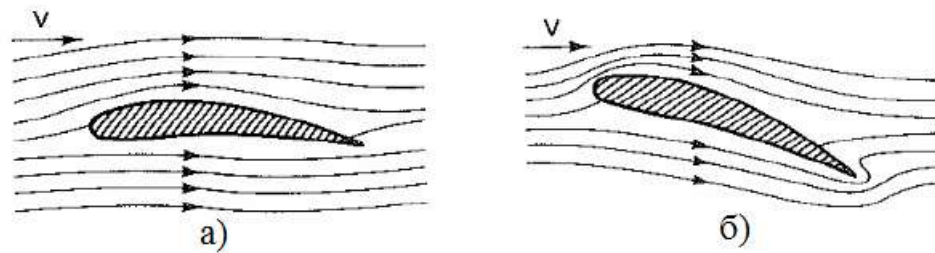


Рисунок 1.3 – Кут атаки [3]:

а) – «малий»; б) – «великий».

Лінія хорди, рис. 1.4 – це умовна пряма, яка проходить через аеродинамічний профіль спойлера та з'єднує його передню і задню кромки. Відстань між цими точками називається довжиною хорди і фактично визначає поздовжній розмір спойлера.

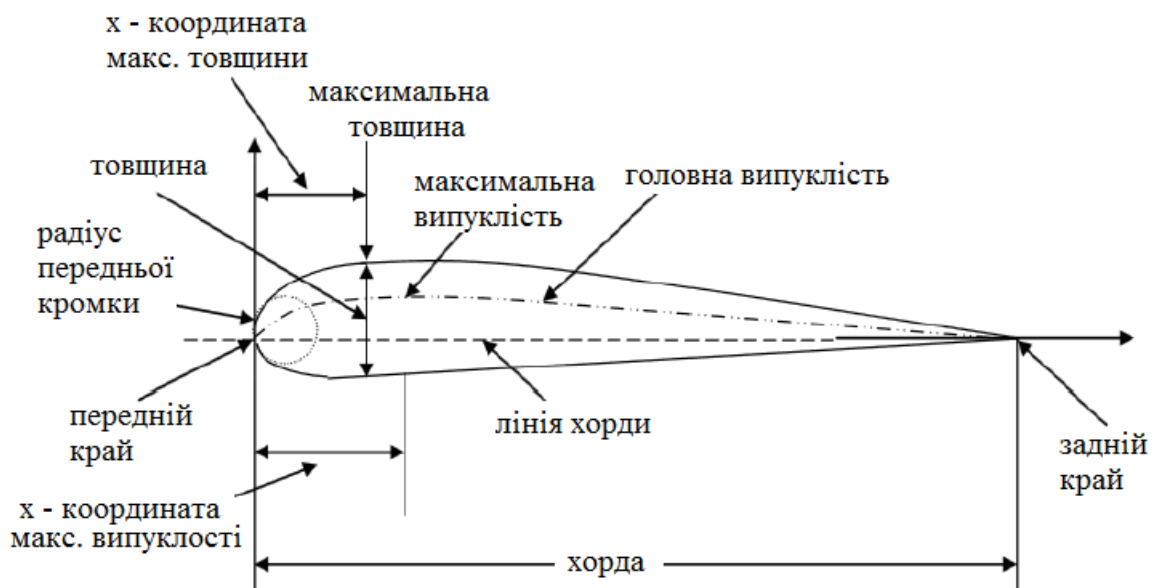


Рисунок 1.4 – Геометрія крила [2].

									Арк.
									11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРМТВА. 22098.01.22.00				

Вигнутість профілю спойлера називають розвалом. Задня кромка є тією частиною аеродинамічного профілю, де з'єднуються повітряні потоки, що рухаються по верхній та нижній поверхнях. Передня кромка, навпаки, є зоною первинного контакту повітряного потоку з профілем. Її геометрія суттєво впливає на аеродинамічні властивості: для роботи на високих швидкостях передній край зазвичай роблять більш гострим, що полегшує обтікання та зменшує турбулентність.

Кут атаки визначається як кут між лінією хорди спойлера та напрямком набігаючого повітряного потоку. Зі збільшенням цього кута зростає як притискна сила, так і аеродинамічний опір, який може перешкоджати подальшому розгону автомобіля. Саме тому можливість регулювання кута атаки є важливою перевагою автоматичних спойлерів.

Завдяки зміні нахилу спойлера можна оптимізувати аеродинамічні характеристики транспортного засобу на різних швидкісних режимах. На великих швидкостях більший кут атаки дозволяє сформувати додаткову притискну силу, яка підвищує стійкість автомобіля та покращує зчеплення шин із дорогою. Регулювання положення спойлера здійснюється шляхом його повороту на шарнірному механізмі, що забезпечує створення спрямованої вниз сили, яка компенсує підйомну дію повітряного потоку.

У деяких сучасних автомобілях, зокрема спортивних моделях серії «Porsche 911», висувні задні спойлери є частиною базової конструкції. Наприклад, у версіях початку 2010-х років спойлер автоматично висувається при досягненні швидкості приблизно 120 км/год і знову складається, коли швидкість зменшується до близько 80 км/год.

Функціонування автоматичного спойлера забезпечується приводним механізмом, який може бути виконаний у вигляді гідравлічного циліндра з поршнем. Керування системою здійснюється за допомогою сервомеханізму, що працює за принципом зворотного зв'язку. Спеціальний перетворювач

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

(датчик) фіксує вхідні параметри, наприклад тиск або положення, і перетворює їх на електричний сигнал. Далі система порівнює задане значення з фактичним і автоматично коригує положення спойлера для зменшення похибки та забезпечення оптимального режиму роботи.

Спойлер може кріпитися за допомогою шарнірних штифтів, розташованих у центральній частині конструкції. Під дією зустрічного повітряного потоку така схема кріплення дає змогу елементу автоматично змінювати своє положення та приймати більший від'ємний кут атаки. У цьому випадку спойлер орієнтується відповідно до напрямку обтікання повітрям і зазнає дії аеродинамічних сил, спрямованих униз і назад. Це сприяє підвищенню зчеплення коліс із дорожнім покриттям і покращує стабільність автомобіля.

Водночас конструкція передбачає можливість зменшення або повного усунення антипідіймальних сил. Для цього на привід подається тиск, який змушує передню частину спойлера підніматися навколо шарнірних опор. У результаті від'ємний кут атаки зменшується, а сам спойлер поступово повертається до положення, близького до нульового кута відносно повітряного потоку.

Висувні задні спойлери, що застосовуються у спортивних моделях, наприклад у серії «Porsche 911», забезпечують підвищену стійкість автомобіля на великих швидкостях. Водночас у складеному положенні вони сприяють зменшенню аеродинамічного опору, що позитивно впливає на витрату палива під час руху на невеликих швидкостях. У версіях із турбованими двигунами часто використовують удосконалені спойлери з більшою робочою площею та додатковими аеродинамічними елементами, наприклад заслінками, які підвищують ефективність обтікання повітря.

На автомобілях можуть встановлюватися різні типи спойлерів у стратегічно важливих зонах кузова, причому кожен із них виконує власну функцію. Зокрема, спойлери на п'єдесталах (стійках), які монтуються на

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

крищі багажника, здатні створювати значну притискну силу завдяки підсиленим аеродинамічним властивостям. Вони змінюють характер повітряного потоку, що дозволяє покращити паливну економічність і загальну ефективність руху.

Зазвичай такі спойлери мають ширину, близьку до ширини багажного відділення автомобіля, та закріплюються у двох або чотирьох точках для забезпечення достатньої жорсткості й надійності конструкції.

1.3 Вибір профілю аеродинамічного та основні вимоги.

Під час розроблення заднього спойлера автомобіля необхідно враховувати нормативні обмеження та технічні вимоги, які забезпечують досягнення оптимальних аеродинамічних характеристик. Головною метою проєктування є зниження лобового опору та підвищення стійкості транспортного засобу на високих швидкостях.

Конструкція спойлера повинна забезпечувати ефективне створення притискної сили, що покращує керуваність і дозволяє автомобілю зберігати надійний контакт шин із дорожнім покриттям під час прискорення. Водночас важливим є досягнення балансу між аеродинамічною ефективністю, вартістю виготовлення та простотою експлуатації, особливо у випадку використання автоматично керованих спойлерів.

Розміщення спойлера має відповідати вимогам безпеки та ергономіки: він не повинен обмежувати огляд водія або ускладнювати доступ до багажного відділення. Орієнтація крила в просторі визначається таким чином, щоб його габарити не виходили за межі умовного контуру, який визначає зовнішні краї задніх шин.

З конструктивної точки зору передня кромка спойлера повинна мати певний мінімальний радіус заокруглення, що зменшує ризик травмування та

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

покращує обтікання повітря. Аналогічно, крайні частини профілю мають відповідати встановленим вимогам щодо товщини та плавності переходів.

На початковому етапі проєктування доцільно визначити максимальну швидкість повітряного потоку, що проходить над задньою частиною автомобіля без встановленого спойлера, а також аналогічний показник після його встановлення. Порівняння цих значень дає змогу оцінити вплив конструкції на формування притискової сили та зміну коефіцієнта аеродинамічного опору. Навіть незначні зміни геометрії антикрила можуть суттєво вплинути на розподіл тиску і, відповідно, на аеродинамічні характеристики транспортного засобу.

Вибір оптимального аеродинамічного профілю для спойлера починається з аналізу маси конструкції, оскільки надмірна вага може негативно впливати на динамічні показники автомобіля. Під час проєктування враховується комплекс критеріїв, серед яких найбільше значення мають експлуатаційні характеристики, вимоги до стабільності та керованості, а також економічні показники.

Спойлер зазвичай має поперечний переріз у вигляді аеродинамічного профілю, головне призначення якого полягає у формуванні оптимального розподілу тиску між верхньою та нижньою поверхнями. Одним із важливих параметрів є висота встановлення крила відносно кришки багажника та узгодження його положення з геометрією кузова.

Аеродинамічний профіль може бути симетричним або вигнутим. У симетричному профілі середня лінія розвалу є прямою, тоді як у вигнутому вона має криволінійну форму. Зазвичай розвал є додатним, а збільшення кута атаки супроводжується зростанням різниці тиску між верхньою та нижньою поверхнями профілю. Це безпосередньо впливає на величину аеродинамічної сили.

Оскільки тиск визначається як відношення сили до площі, аеродинамічну силу, що створюється профілем у повітряному потоці, можна

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оцінити шляхом множення середнього тиску на ефективну площу поверхні. Такий підхід дає змогу виконати попередні розрахунки та обґрунтувати вибір геометричних параметрів спойлера.

Загальну аеродинамічну силу, що діє на профіль, можна визначити шляхом інтегрування розподілу тиску по всій його поверхні. Її величина, напрямок і точка прикладання залежать від геометричних параметрів аеродинамічного профілю, зокрема кута атаки, характеристик повітряного потоку та відносної швидкості руху. Тому під час проектування профіль спойлера прагнуть сформувавши так, щоб досягти якомога меншого коефіцієнта лобового опору при забезпеченні необхідної притискної сили.

Одним із найбільш поширених джерел вихідних даних для створення аеродинамічних профілів є серії профілів «НАСА» [4], які широко застосовуються і в автомобільній аеродинаміці. Зокрема, чотиризначні профілі цієї серії часто використовують як базу для проектування автомобільних спойлерів.

У позначенні чотиризначного профілю перша цифра визначає максимальну величину розвалу у відсотках від довжини хорди. Друга цифра показує положення точки максимального розвалу, виражене у десятих частках довжини хорди. Дві останні цифри характеризують максимальну товщину профілю, також у відсотках від хорди. Якщо перша цифра дорівнює нулю, це означає, що профіль є симетричним у поперечному перерізі.

Форма розвалу у чотиризначних профілях описується двома параболічними ділянками: перша формує контур від передньої кромки до точки максимального вигину, а друга – від цієї точки до задньої кромки. Такий підхід дає змогу забезпечити плавний розподіл тиску та стабільні аеродинамічні характеристики.

Наприклад, профіль «НАСА 1408» [4] має відносну товщину 8 % від довжини хорди (що відповідає останнім двом цифрам у позначенні). Максимальний розвал становить 1 % від хорди, а його розташування –

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

приблизно на 40 % довжини профілю від передньої кромки. Подібні параметри дозволяють отримати збалансоване співвідношення між притискною силою та аеродинамічним опором, що є важливим під час розроблення ефективних автомобільних спойлерів.

1.4 Теоретичні основи поняття лобового опору.

Лобовий опір – це аеродинамічна сила, яка виникає під час руху тіла в повітряному або рідинному середовищі та спрямована проти напрямку його швидкості. Величина цієї сили залежить від різниці швидкостей між потоком середовища і поверхнею тіла [1].

Існує кілька складових аеродинамічного опору. Однією з них є опір тертя, який виникає внаслідок взаємодії молекул повітря з поверхнею твердого тіла в прикордонному шарі. Його значення визначається властивостями середовища та характером поверхні: гладкі поверхні створюють менший опір, ніж шорсткі. На величину тертя також впливають в'язкість потоку та співвідношення між інерційними і в'язкісними силами, що описується числом Рейнольдса [2].

У зоні біля поверхні тіла формується потік зі зниженою енергією, параметри якого залежать від стану прикордонного шару та величини поверхневого тертя. Крім того, значний внесок у загальний опір робить форма профілю. Зміни швидкості та тиску повітря, що обтікає спойлер, сприяють утворенню притискної сили, яка покращує контакт шин із дорогою.

Ще одним різновидом є індукований або інтерференційний опір, пов'язаний з утворенням вихорів у зоні позаду тіла. Вихор у гідродинаміці розглядається як область, де потік має обертальний характер. Такі завихрення виникають через зміну напрямку руху повітря навколо спойлера і призводять до додаткових енергетичних втрат.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кількісно аеродинамічний опір характеризується коефіцієнтом лобового опору, який визначається як відношення сили опору до сили, що створюється динамічним тиском потоку на контрольну площу. Для умов руху з відносно великими швидкостями і високими значеннями числа Рейнольдса ($Re > 1000$) силу опору можна визначити за залежністю [5]:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A \quad (1.1)$$

де (F_d) - сила опору, ρ - густина повітря, (v) - швидкість руху тіла відносно потоку, (A) - характерна площа, (C_d) - коефіцієнт опору.

Із цієї формули випливає, що при збільшенні швидкості аеродинамічний опір зростає пропорційно квадрату швидкості.

Вираз для коефіцієнта опору може бути отриманий на основі рівняння «Daniel Bernoulli» для повного тиску в потоці рідини або газу. У цьому рівнянні враховуються три складові: статичний (атмосферний) тиск, гідростатичний тиск, пов'язаний із дією сили тяжіння, та динамічний тиск, який визначається швидкістю потоку. Саме останній компонент безпосередньо пов'язаний із виникненням сили опору.

На величину коефіцієнта лобового опору впливають такі фактори, як в'язкість середовища, форма та шорсткість поверхні. У ламінарному режимі обтікання домінує в'язкий опір, тоді як турбулентний режим спричиняє зростання втрат енергії через інтенсивне перемішування потоку. Поверхневе тертя також відіграє важливу роль, оскільки рухоме повітря взаємодіє з зовнішньою оболонкою спойлера.

Таким чином, сила опору прямо залежить від густини середовища, площі обтікання та швидкості руху транспортного засобу. Зі збільшенням швидкості або прискорення автомобіля значення опору зростає, що підтверджується залежністю, отриманою з рівняння Бернуллі. Отже,

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

аеродинамічний опір має нелінійний характер і пов'язаний зі швидкістю приблизно квадратичною залежністю.

1.5 Теоретичні основи поняття притискної сили.

Відповідно до класичних законів механіки, сформульованих «Isaac Newton» [5], у замкненій системі енергія не зникає, а лише переходить з однієї форми в іншу. Спираючись на ці положення, «Daniel Bernoulli» встановив, що для сталого потоку рідини або газу сума складових енергії залишається сталою вздовж лінії течії. Це означає, що збільшення швидкості потоку супроводжується зменшенням його статичного тиску.

Аеродинамічна сила, яка діє на крило або спойлер, визначається інтегруванням змін тиску по всій його поверхні. Роботу аеродинамічного профілю зручно розглядати на прикладі крила, що знаходиться у рівномірному ламінарному повітряному потоці. Геометрія спойлера зазвичай передбачає зміну товщини та кривизни поверхонь, унаслідок чого повітряні потоки рухаються з різними швидкостями вздовж верхньої та нижньої частин профілю.

Унаслідок прискорення потоку на одній із поверхонь тиск там зменшується, тоді як на протилежній стороні він залишається вищим. Сформована різниця тисків створює результуючу силу, спрямовану вниз, яка й називається притискною силою. Вона сприяє кращому контакту шин із дорожнім покриттям і підвищує стійкість автомобіля під час руху на великих швидкостях.

Контурна форма крила або спойлера забезпечує зміну напрямку руху повітряного потоку, що також впливає на формування притискної сили. Потік, який проходить по довшій і більш вигнутій поверхні профілю, прискорюється сильніше, що додатково збільшує перепад тиску.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Теоретичний опис таких процесів ґрунтується на рівняннях ідеальної рідини, відомих як рівняння «Leonhard Euler», які відображають закони збереження маси, імпульсу та енергії за умови нехтування в'язкістю середовища. Використання цих підходів дає змогу пояснити механізм виникнення притискної сили та обґрунтувати вибір геометричних параметрів спойлера під час його проєктування.

1.6 Теоретичні основи поняття турбулентних і ламінарних потоків.

Під час руху автомобіля в нерухомому повітряному середовищі його геометрична форма впливає на характер обтікання повітряним потоком. У різних зонах навколо кузова швидкість частинок повітря може відрізнитися, що визначає тип течії. Якщо повітряні шари переміщуються впорядковано, практично не змішуючись між собою і рухаючись паралельними траєкторіями, такий режим називають ламінарним, рис. 1.5 [2].

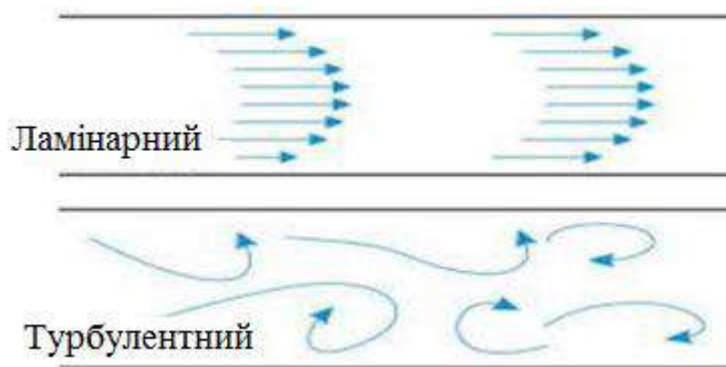


Рисунок 1.5 – Повітряні потоки.

На відміну від цього, турбулентний потік характеризується хаотичним рухом частинок із постійними локальними змінами швидкості та напрямку. При цьому середнє значення швидкості може залишатися таким самим, як і в ламінарному режимі, однак миттєві параметри руху істотно відрізняються.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Визначення типу течії має велике значення для аналізу аеродинамічних характеристик автомобіля, оскільки такі явища, як відрив потоку від поверхні, утворення вихорів і величина аеродинамічного опору, значною мірою залежать від режиму обтікання. У відносно спокійних умовах руху переважає ламінарний характер потоку. Проте наявність елементів аеродинамічного обвісу, зокрема спойлерів, а також вплив інших транспортних засобів або нерівностей дороги можуть спричинити перехід течії у турбулентний стан.

Навіть якщо потік спочатку є ламінарним, збурення, створені самим автомобілем, можуть викликати його дестабілізацію та подальший перехід до турбулентності. Одним із призначень спойлера є керування цими процесами. Потрапляючи на поверхню спойлера, повітряний потік змінює свій напрям і структуру, що сприяє утворенню вихорів у задній частині кузова. Унаслідок цього формується додаткова притискна сила, яка підвищує зчеплення шин із дорожнім покриттям і покращує стійкість автомобіля під час руху.

1.7 Числа Маха і Рейнольдса.

Число Рейнольдса є одним із ключових критеріїв у автомобільній аеродинаміці, оскільки воно дозволяє оцінити характер обтікання кузова та аеродинамічних елементів, зокрема спойлера. Значні значення цього параметра зазвичай відповідають турбулентному режиму течії, тоді як малі – ламінарному.

Зі зростанням числа Рейнольдса змінюються умови формування прикордонного шару як у ламінарному, так і в турбулентному режимах. Це впливає на величину поверхневого тертя, яке виникає внаслідок взаємодії повітряного потоку з поверхнею автомобіля. Рівень цього тертя залежить від шорсткості поверхні, геометрії профілю спойлера, якості його обробки, а також від стабільності потоку та відсутності вібрацій.

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фізично число Рейнольдса визначає співвідношення між інерційними силами потоку та силами в'язкості середовища і може бути подане у вигляді залежності [2]:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}, \quad (1.2)$$

де (Re) – число Рейнольдса, (v) – швидкість потоку, (ρ) – густина повітря, (L) – характерний розмір (наприклад, довжина хорди спойлера), (μ) – динамічна в'язкість.

Таким чином, величина аеродинамічного опору, який виникає під час обтікання спойлера, значною мірою визначається значенням числа Рейнольдса, що робить його важливим параметром під час розрахунків і оптимізації конструкції.

Ще одним важливим безрозмірним параметром, який характеризує властивості повітряного потоку, є число Маха. Воно показує співвідношення між швидкістю руху потоку та швидкістю поширення звукових хвиль у середовищі. При збільшенні швидкості транспортного засобу до значень, близьких до швидкості звуку, повітря починає стискатися, що призводить до зміни його щільності, тиску та температури.

Швидкість звуку залежить від температури повітря: за вищих температур інтенсивність зіткнень молекул зростає, що впливає на швидкість поширення збурень у середовищі. Саме тому число Маха визначається як [2]

$$M = \frac{v}{a}, \quad (1.3)$$

де (M) – число Маха, (v) – швидкість потоку, (a) – швидкість звуку в даному середовищі.

З погляду аеродинаміки автомобілів розрізняють кілька режимів течії. При дозвукових швидкостях ((M < 1)) стисливість повітря практично не

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

впливає на характеристики потоку, і він плавно обтікає поверхню кузова. У трансзвуковій області ($(M=1)$) зміни густини та швидкості стають співрозмірними, що може призводити до появи локальних ударних хвиль. У надзвуковому режимі ($(M > 1)$) стисливість середовища відіграє визначальну роль, а параметри потоку, такі як тиск і температура, різко зростають залежно від інтенсивності руху.

Отже, урахування числа Маха є важливим під час аналізу аеродинамічних процесів на високих швидкостях і дозволяє більш точно оцінити поведінку повітряного потоку навколо спойлера та кузова автомобіля.

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ТЕХПРОЦЕС ВИГОТОВЛЕННЯ СПОЙЛЕРА АВТОМОБІЛЯ

2.1 Вибір матеріалів.

У виробництві автомобільних спойлерів застосовується широкий спектр технологічних процесів, серед яких найбільш поширеними є ручне формування, вакуумне формування та методи нанесення матеріалу розпиленням. Під час виготовлення деталі необхідно враховувати три ключові аспекти: економічну доцільність, вибір сировини та відповідний спосіб виробництва.

Залежно від обраної технології визначається тип матеріалу, який використовується для формування виробу. Наприклад, армувальні матеріали на основі скловолокна або інших композитів укладають у спеціальну форму, після чого під дією температури та тиску їм надається необхідна геометрія корпусу спойлера.

Собівартість виготовлення деталей в автомобільній галузі є значним фактором, що впливає на конкурентоспроможність продукції. Виробництво спойлерів із композитних матеріалів може бути досить затратним, однак попит на доступні за ціною та водночас ефективні аеродинамічні елементи змушує виробників оптимізувати технологічні процеси. Основними чинниками, які визначають вартість виробу, є ціна сировини, тривалість виробничого циклу, складність складання та обсяги серійного випуску.

Оцінювання витрат є важливим етапом підготовки виробництва, оскільки дозволяє прогнозувати кінцеву собівартість, формувати цінову політику та порівнювати альтернативні конструктивні рішення. Для цього аналізують витрати на матеріали, оплату праці, обладнання та особливості застосованих технологій. У технічній документації на спойлер обов'язково зазначають тип армувальних волокон і матричного матеріалу, їх орієнтацію, а також обраний спосіб виготовлення.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім того, важливу роль відіграє точність конструкторської документації та правильне визначення вимог до оснащення і допоміжних пристроїв. Розуміння тривалості технологічного циклу та особливостей обробки дає змогу оцінити продуктивність виробництва, спланувати пакування та забезпечити дотримання графіків постачання готової продукції.

Матеріали, що застосовуються у виробництві композитних конструкцій, умовно поділяють на дві основні групи: терморективні та термопластичні полімери. Термопласти можуть повторно розм'якшуватися і змінювати форму під дією температури навіть після затвердіння, тоді як терморективні матеріали після полімеризації вже не піддаються переплавленню [8].

Кожен із цих типів має власні переваги та обмеження, пов'язані з вартістю, технологічністю обробки, можливістю вторинної переробки, експлуатаційними характеристиками та умовами зберігання. Вибір матеріалу часто залежить від конкретного методу виробництва: наприклад, у процесах лиття під тиском використовують гранульовану сировину, тоді як у технологіях намотування або формування застосовують безперервні волокна разом із рідкими смолами.

Композитні матеріали зазвичай складаються з двох основних компонентів – армувального наповнювача та полімерної матриці. Армування виконує роль силового каркаса, який забезпечує жорсткість і міцність конструкції. Для цього використовують скляні, вуглецеві, арамідні або борні волокна, діаметр яких зазвичай становить приблизно від 5 до 20 мкм. Характеристики найбільш розповсюджених таких матеріалів наведено в таблиці 2.1 [9].

До поширених форм армувальних матеріалів належать вуглецеві джгути, склоровінг, арамідна пряжа та ткані полотна. Їхні фізико-механічні характеристики враховуються під час вибору оптимальної структури композиту та наведені у відповідних таблицях властивостей.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Термін «E-glass» у міжнародній практиці застосовується для позначення алюмо-боросилікатного скла з вмістом лужних оксидів менше ніж 2 %. Завдяки своїм технологічним властивостям цей матеріал набув найширшого використання у промисловості. Саме з нього можливо отримувати надтонкі безперервні волокна значної довжини, що робить його придатним для виготовлення різноманітних армувальних елементів композитів [9].

Таблиця 2.1 – Властивості композитних армуючих волокон.

Матеріал	Модуль міцності на розтяг (E) (ГПа)	Міцність на розрив (δ) (ГПа)	Подовження (ϵ) (%)	Щільність (ρ) (мг/м ³)	Питомий модуль (E/ ρ) (мг/кг)	Вартість (\$/кг)
E-glass	72,4	2,4	2,6	2,54	28,5	1,1
S-glass	85.5	4.5	2.0	2.49	34.3	22...33
кевлар	124	3.6	2.3	1.45	86	22...33
HS графіт	253	4.5	1.1	1,80	140	66...110
HM графіт	520	2.4	0,6	1,85	281	220...660

«S-glass» – це високоміцний різновид скловолокна, який характеризується підвищеною жорсткістю, міцністю та стійкістю до корозійного впливу. Завдяки цим властивостям матеріал широко застосовується у виробництві конструкцій, що працюють в умовах значних механічних навантажень [9].

Арамідні волокна, зокрема «кевлар», можуть використовуватися у вигляді ниток або тканин. Найчастіше їх застосовують у складі композитних матеріалів у поєднанні з різними полімерними смолами. Такі тканини

належать до важкогорючих матеріалів. Волокна мають характерний жовтий колір, однак, на відміну від вуглецевих, можуть піддаватися фарбуванню. В автомобільній галузі арамід використовують для підсилення аеродинамічних елементів кузова, а також силових вузлів, наприклад захисту двигуна або компонентів тюнінгу.

Підбір матричного матеріалу визначається низкою чинників, серед яких теплові характеристики, економічна доцільність, доступність, екологічні та санітарні вимоги, а також технологічність обробки. Полімерна матриця виконує функцію зв'язувального середовища, що передає навантаження між волокнами, зберігає їх орієнтацію та забезпечує захист окремих ниток від пошкодження.

При виборі смоли важливими параметрами є модуль пружності, міцність, текучість, а також загальні механічні властивості. У автомобільній промисловості найбільш поширеними є дві групи полімерних систем – терморезистивні та термопластичні.

Терморезистивні полімери широко застосовують у конструкційних композитах завдяки поєднанню достатньої механічної та термічної стійкості, хорошого зчеплення з армувальними волокнами, відносно простої технології формування і невисокої вартості. Термопласти, навпаки, характеризуються більшою в'язкістю і, як правило, гіршою адгезією до волокон, однак вони мають переваги у вигляді можливості вторинної переробки, низького рівня викидів летких речовин і підвищеної ударної міцності.

Вибір конкретної смоли пов'язаний із аналізом її фізико-хімічних характеристик, зокрема в'язкості, температури склування, тривалості гелеутворення та затвердіння, умов ін'єкційного формування, термічної стабільності, стійкості до впливу навколишнього середовища та рівня емісії під час переробки. Також враховують механічні показники – опір міжшаровому руйнуванню, модуль пружності в різних напрямках, загальну міцність та довговічність матеріалу.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Серед термореактивних систем, що найчастіше використовуються у виробництві композитів, можна виділити епоксидні, поліефірні та вінілоєфірні смоли. Вони забезпечують якісне просочення армувальних матеріалів, таких як скловолокно, вуглецеві або арамідні волокна, що є важливим для отримання міцної та однорідної структури виробу.

Як зазначалося, композитні конструкції складаються з армувального наповнювача та матричного матеріалу. Матриця оточує волокна, сприяє рівномірному розподілу навантажень і дозволяє конструкції витримувати значні деформації завдяки меншому модулю пружності та більшому відносному подовженню.

Вибір матриці повинен відповідати вимогам до хімічної та термічної стійкості, електричних характеристик, горючості, вартості, екологічності, технологічності виробництва та експлуатаційних показників. Саме матричний матеріал значною мірою визначає допустиму робочу температуру композиту та особливості його виготовлення.

Епоксидні смоли являють собою полімерні системи, що містять одну або кілька епоксидних груп, здатних переходити у тривимірну термореактивну структуру в процесі полімеризації. Найпростіша епоксидна група складається з атома кисню та двох атомів вуглецю, які утворюють тричленне кільце – базовий елемент хімічної будови таких матеріалів.

Епоксидні смоли належать до найбільш поширених полімерних матричних матеріалів, що застосовуються у виробництві композитів. Їх популярність зумовлена універсальністю, широким спектром фізико-механічних характеристик і різноманітними можливостями технологічної обробки. Такі смоли можуть комбінуватися між собою або модифікуватися шляхом введення додаткових компонентів для досягнення необхідних експлуатаційних властивостей. Крім того, технологічні параметри, зокрема швидкість полімеризації, можна регулювати залежно від умов виготовлення виробу.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Типові значення основних характеристик епоксидних смол наведено в таблиці 2.2 [10].

Таблиця 2.2 – Типовий діапазон властивостей епоксидних смол.

Питома вага	1,2 – 1,3
Модуль міцності (МПа)	2500 – 4500
Міцність на розрив (МПа)	50 – 150
Коефіцієнт теплового розширення, $10^{-6}\text{мм}/^{\circ}\text{C}$	45 – 70
Вологопоглинання (% за 24 години)	0,05 – 0,15

Під час затвердіння епоксидні системи не переходять у легкий стан навіть за наявності розчинників. Полімеризація може відбуватися як унаслідок взаємодії між епоксидними групами різних молекул, так і через реакцію цих груп з іншими активними сполуками. Процес здатний протікати з використанням каталізаторів або без них.

Твердження епоксидних смол супроводжується виділенням тепла, тому його відносять до екзотермічних реакцій. У результаті формування просторової полімерної сітки спостерігається певна усадка матеріалу. Вплив вологи може призводити до погіршення властивостей таких смол, зокрема до зниження температури склування, що пов'язано з утворенням водневих зв'язків у полімерній структурі. Це, своєю чергою, впливає на в'язкість і міцність матеріалу в умовах експлуатації.

Епоксидні смоли мають аморфну будову, а їх робочий температурний діапазон зазвичай обмежується значеннями, нижчими за температуру теплової деформації або склування. Важливою перевагою цих матеріалів є добрі електроізоляційні характеристики: діелектрична проникність становить приблизно 3–6, а втрати енергії в електричному полі залишаються

незначними. Разом з тим підвищення температури та вологості може негативно впливати на ці показники.

Сфера застосування епоксидних смол досить широка. Їх використовують як клеї, зв'язувальні компоненти в композитах і ламінатах, захисні покриття, а також у процесах формування та механічної обробки виробів. Композитні матеріали на їх основі здатні зберігати задовільні експлуатаційні властивості як при кімнатній температурі, так і при підвищених значеннях, приблизно до 90–120 °С. Епоксидні системи можуть випускатися у рідкому, твердому або напівтвердому стані [10].

Рідкі смоли широко застосовують у таких технологіях, як намотування волокон, пултрузія, ручне формування та інші процеси, де використовуються армувальні матеріали зі скла, вуглецю, арамиду або бору. Хоча затверділі епоксидні композиції можуть проявляти крихкість, введення термопластичних модифікаторів дозволяє підвищити їхню ударну в'язкість і жорсткість. При цьому вартість таких систем зазвичай перевищує вартість поліефірних або вінілоєфірних смол.

Поліефірні смоли отримують у результаті реакції двоосновних органічних кислот із двоатомними спиртами. За структурою їх поділяють на насичені (наприклад, поліетилентерефталат) та ненасичені. Ненасичені поліефіри мають лінійну полімерну будову з реакційноздатними подвійними зв'язками, у яких можуть брати участь мономер-розчинники, зокрема стирол. У процесі полімеризації формується просторова сітчаста структура, що забезпечує необхідні механічні характеристики композитного матеріалу.

Поліефірні смоли часто розбавляють стиролом, що зменшує їхню в'язкість і полегшує технологічну обробку матеріалу. Для ініціювання процесу затвердіння зазвичай застосовують органічні пероксиди, зокрема пероксид бензоїлу або метилетилкетонпероксид. Під час реакції ці ініціатори розкладаються з утворенням вільних радикалів, які запускають полімеризацію. Швидкість тверднення залежить від температури обробки та

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

концентрації ініціатора: підвищення будь-якого з цих параметрів прискорює перебіг реакції.

Коли смола переходить із рідкого стану у твердий і крихкий, часто проводять додаткове термічне витримання. Така післяобробка сприяє більш повному зшиванню полімерної структури і, відповідно, підвищує температуру склування (T_g).

Ортофталеві поліефірні смоли характеризуються відносно обмеженими механічними показниками та чутливістю до впливу навколишнього середовища. Натомість ізофталеві поліефіри відзначаються кращою хімічною стійкістю та вищими експлуатаційними характеристиками. Загалом для термореактивних поліефірів характерні такі орієнтовні властивості: густина в межах 1,1–1,4; модуль пружності приблизно 2000–4400 МПа; міцність при розтягу 33–104 МПа; коефіцієнт теплового розширення близько $55\text{--}100 \times 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$; водопоглинання за добу становить близько 0,15–0,65 % [9, 10].

Поліефірні смоли відзначаються доброю корозійною стійкістю та відносно низькою вартістю, хоча їх робочі температури зазвичай нижчі, ніж у епоксидних матеріалів. Вони можуть належати як до термореактивних, так і до термопластичних полімерів і широко застосовуються в технологіях виробництва композитів, наприклад у процесах намотування волокон.

Ненасичені поліефіри отримують шляхом поліконденсації ненасичених двоосновних кислот із двофункціональними спиртами. У процесі тверднення подвійні зв'язки в поліефірному ланцюзі реагують із реакційноздатними мономерами, такими як стирол, утворюючи поперечні зшивки. Зазвичай вміст стиrolу становить близько 30–50 % маси композиції, хоча останнім часом його використання намагаються зменшити через екологічні та санітарні обмеження.

Вінілєфірні смоли формуються внаслідок взаємодії ненасичених кислот з епоксидними сполуками. За будовою вони близькі до поліефірів, проте відрізняються розташуванням реакційноздатних груп, які знаходяться

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переважно на кінцях макромолекулярних ланцюгів. Завдяки цьому вся довжина ланцюга ефективніше сприймає ударні навантаження, що забезпечує підвищену міцність і еластичність матеріалу. Вінілоєфіри також мають високу хімічну та корозійну стійкість і широко використовуються, зокрема, в автомобільній галузі та інших сферах масового виробництва. За своїми властивостями вони перевершують полієфірні смоли, але залишаються дешевшими за епоксидні системи.

Акрилатні ефіри зазвичай розчиняють у стирольному мономері для отримання вінілоєфірних смол, тверднення яких ініціюється органічними пероксидами. Завдяки цьому композитні матеріали на основі таких смол можуть поєднувати підвищену міцність із високою стійкістю до корозійного впливу.

Після полімеризації вінілоєфірні смоли характеризуються більшою пластичністю та міцністю порівняно з полієфірними або епоксидними системами. Це пояснюється меншою кількістю ненасичених ділянок у їхній молекулярній структурі, які беруть участь у формуванні поперечних зв'язків. Для термореактивних вінілоєфірів типовими є такі орієнтовні показники: густина становить близько 1,1–1,3; модуль пружності перебуває в межах 3000–3700 МПа; межа міцності при розтягу — приблизно 70–81 МПа; коефіцієнт теплового розширення — близько $50\text{--}55 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ [8-10].

2.2 Виробничі методи формування композитів.

Метод ручного укладання належить до найстаріших технологій відкритого формування, що застосовується для виготовлення композитних виробів, наприклад аеродинамічних елементів автомобілів. Ця технологія є доволі трудомісткою та передбачає використання армувальних матеріалів у вигляді рубаного волокна або тканин із спрямованими нитками. У таких

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

процесах найчастіше застосовують поліефірні, епоксидні та вінілоефірні смоли.

Під час виготовлення матеріали вручну укладають у односторонню форму (матрицю), після чого на поверхню армування наносять рідку смолу, рис. 2.1. Саме армувальний компонент забезпечує необхідну жорсткість, міцність і здатність композиту витримувати експлуатаційні навантаження. Захоплене повітря поступово видаляють за допомогою прокатування спеціальними валиками, що дозволяє сформувати щільний ламінат. Зазвичай процес відбувається за кімнатної температури, що сприяє ефективному твердненню.



Рисунок 2.1 – Процес ручного укладання.

Формування композитної деталі здійснюється шляхом послідовного нанесення шарів армування та смоли з подальшим рівномірним розподілом останньої по поверхні. Це також допомагає усунути повітряні включення перед завершенням укладання. Як правило, виріб залишають тверднути приблизно на добу при кімнатній температурі. За потреби цей процес можна прискорити, використовуючи тепле повітря, додаткове прокатування або спеціальні гелеутворювальні системи [8-10].

Для забезпечення належної якості поверхні перед початком формування форму покривають розділювальним (антиадгезійним) складом, що полегшує вилучення готової деталі. Недостатня кількість такого покриття

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

може призвести до прилипання виробу до матриці. Зовнішній шар зазвичай формують за допомогою гелькоуту, який повинен частково затвердіти перед укладанням наступних армувальних шарів. Кожен шар просочують каталізованою смолою та розрівнюють щіткою або валиком. Після завершення укладання деталь витримують при нормальній або підвищеній температурі до повного тверднення.

Метод ручного укладання має низку переваг: він є технологічно простим, універсальним щодо орієнтації волокон і не потребує значних витрат на обладнання. Це робить його доцільним для дрібносерійного виробництва або виготовлення великих виробів при мінімальних капіталовкладеннях.

Разом із тим технологія має і суттєві обмеження. Вона вимагає значних трудових витрат і високої кваліфікації персоналу для отримання виробів належної якості. Крім того, складно забезпечити точний контроль товщини та вмісту волокна, що ускладнює досягнення високої об'ємної частки армування. Це також може призводити до зниження точності геометричних розмірів готових деталей.

Метод розпилення належить до технологій відкритого формування і за своєю суттю є подібним до ручного укладання. Основна відмінність полягає у способі нанесення армувальних матеріалів і смоли на поверхню форми. Якщо при ручному формуванні використовують валики або щітки, то в цьому випадку застосовують спеціальний розпилювальний пістолет.

У процесі використовують рубане скловолокно разом із каталізованою смолою. Розпилювальний пристрій одночасно подає смолу та нарізає безперервне волокно на відрізки довжиною приблизно 10–40 мм, після чого суміш під тиском наноситься на підготовлену форму, рис. 2.2. Завдяки цьому продуктивність значно вища, ніж при ручному укладанні. Тверднення матеріалу зазвичай відбувається за нормальної температури навколишнього середовища.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Перед початком формування поверхню матриці обробляють розділювальним складом, після чого наносять гелькоут. Йому дають частково затвердіти – як правило, близько двох годин. Після цього за допомогою пістолета-розпилювача на форму наносять суміш смоли та подрібненого волокна. Отримана товщина шару значною мірою залежить від характеру руху розпилювача та режиму нанесення.

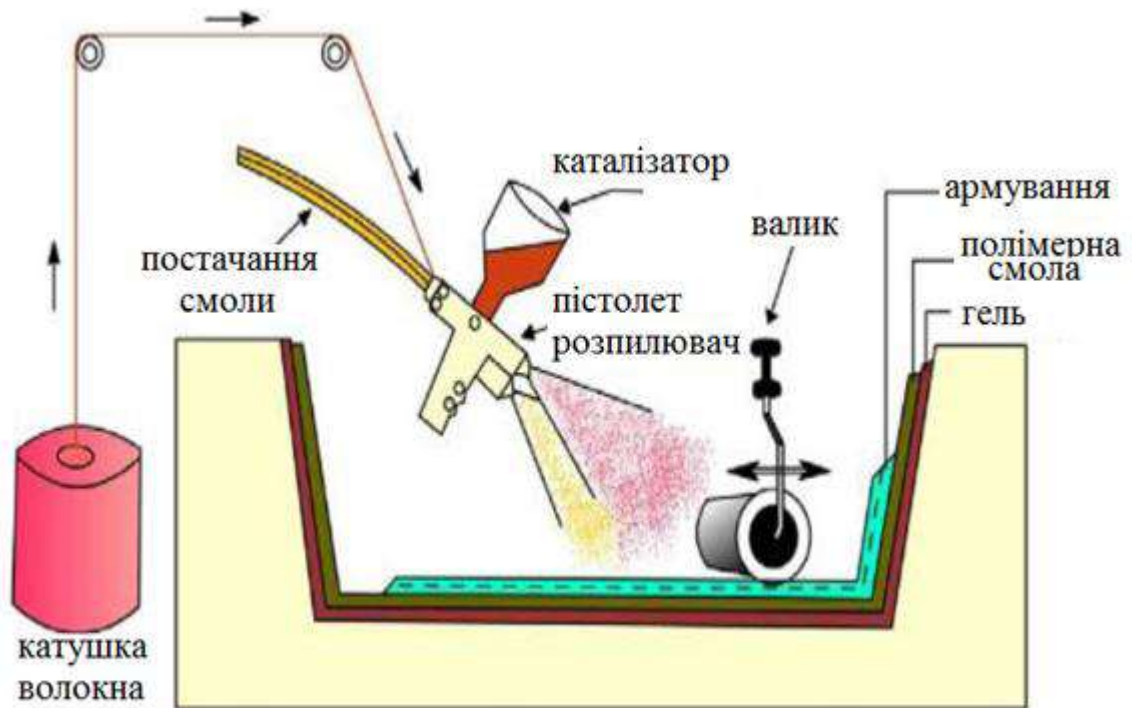


Рисунок 2.2 – Процеси розпилювального формування.

Далі матеріал прокатують валиками або розрівнюють щітками, щоб видалити повітряні включення і забезпечити повне просочення волокон. Після цього виріб залишають до повного затвердіння при кімнатній температурі. До основних підготовчих операцій також належать нанесення воскових покриттів і полірування поверхні форми, що полегшує вилучення готової деталі.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Іноді поверх гелькоуту наносять додатковий бар'єрний шар. Його можуть піддавати термічній обробці в печі для запобігання прояву структури волокон на зовнішній поверхні виробу під час полімеризації.

Метод розпилення має низку переваг порівняно з ручним укладанням. Він дозволяє швидше виготовляти деталі невеликого та середнього розміру, використовуючи відносно дешеві матеріали й оснащення. Готові вироби зазвичай мають якісну та гладку поверхню з боку форми, тоді як протилежна сторона може залишатися більш шорсткою.

Разом із тим ця технологія має певні обмеження. Вона не завжди придатна для виготовлення елементів із високими конструкційними вимогами, оскільки складно точно регулювати товщину ламінату та об'ємну частку армувального матеріалу. Це може впливати на стабільність механічних характеристик і точність геометричних параметрів виробів.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. ПРОЄКТУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНОГО СПОЙЛЕРА

3.1 Розробка продукту для проектування.

Після формування початкової ідеї продукт проходить низку послідовних етапів перед тим, як буде створено його фізичну конструкцію та розпочато виготовлення. Основним призначенням цих етапів є зменшення ймовірності помилок у майбутньому та оптимізація витрат на виробництво.

Проедктування можна розглядати як поетапний процес уточнення інформації про майбутній об'єкт, у ході якого вихідні дані доповнюються, коригуються та конкретизуються. Успішність цього процесу значною мірою залежить від якісної концептуалізації ідеї та її подальшого деталізування у вигляді технічних вимог і специфікацій, що дає змогу використати зібрані відомості для створення необхідного виробу, зокрема спойлера [11].

- Етап концептуального проектування.

Початком цієї стадії зазвичай є запит замовника або потреба ринку в новому продукті. На цьому етапі визначаються та аналізуються функціональні характеристики і вимоги до ефективності виробу. До роботи залучаються фахівці з різних підрозділів – інженерії, виробництва, матеріалознавства, маркетингу, продажів і фінансів, а інколи й самі замовники.

Отримані вимоги трансформуються у попередню тривимірну форму та габарити виробу без детального опрацювання геометрії чи технологічних аспектів. Такий підхід дозволяє сформувавши базову концепцію, розглянути можливі сценарії виготовлення, оцінити технічну здійсненність та приблизну собівартість. Паралельно проводиться аналіз ринку та конкурентних аналогів, вивчається досвід попередніх розробок, розраховується економічна доцільність і очікувана окупність. За результатами цього етапу ухвалюється рішення про доцільність подальшої реалізації проекту.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

- Етап детального проектування.

На наступній стадії на основі концептуальних рішень створюється кілька можливих варіантів конструкції спойлера. Формуються повні технічні креслення з точними розмірами із застосуванням систем автоматизованого проектування, наприклад SolidWorks. Також визначаються матеріали та їхні технічні характеристики.

Розроблена конструкція проходить перевірку на відповідність функціональним вимогам, показникам міцності, довговічності та іншим критеріям. Після цього виготовляються прототипи окремих деталей або виробу в цілому. Якщо отримані елементи відповідають заданим параметрам, прототип піддається випробуванням для оцінювання його експлуатаційних властивостей.

Тестування спрямоване на виявлення конструктивних можливостей виробу, зокрема його стійкості до дії високих і низьких температур, впливу вологи чи інших рідин, а також на перевірку надійності роботи протягом тривалого часу. Результати випробувань дають змогу зробити висновки щодо доцільності обраного дизайну та ефективності застосованих технологічних рішень перед переходом до серійного виробництва.

У процесі розробки продукцію необхідно всебічно оцінювати, щоб переконатися у її відповідності технічним характеристикам і вимогам споживачів. Для вибору оптимального варіанта конструкції можуть застосовуватися різні методи порівняльного аналізу, зокрема матричний метод П'ю. Він передбачає формування системи критеріїв оцінювання та порівняння кількох альтернативних варіантів дизайну, що значно полегшує прийняття обґрунтованого рішення під час розробки композитних виробів.

За результатами оцінювання за встановленими критеріями обирається варіант конструкції, який отримав найвищий інтегральний бал. Прототип деталі, визначений як оптимальний після остаточного вибору матеріалів і технології виготовлення, підлягає обов'язковій перевірці та випробуванням.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Автомобільний спойлер потребує проведення додаткових досліджень, спрямованих на підтвердження його безпечної та стабільної роботи в різних умовах експлуатації. Зокрема, важливим етапом є випробування в аеродинамічній трубі, яке дає змогу оцінити вплив спойлера на аеродинамічні характеристики транспортного засобу, у тому числі зміну притискної сили та гальмівного ефекту.

Таблиця 3.1 – Концепції дизайну для оцінювання.

Фактори	Вплив (%)	Дизайн «А»	Дизайн «В»	Дизайн «С»
Вага	15	3	4	3
Час складання	15	3	5	3
Вартість	20	4	5	3
Шум	5	3	3	4
Продуктивність	10	3	4	3
Надійність	5	2	4	3
Кількість деталей	10	2	4	3
Простота обслуговування	8	2	5	3
Міцність	7	3	4	3
Естетика	5	3	4	4
Всього	100	2,92	4,38	3,1

Крім того, виконуються статичні й динамічні випробування, що дозволяють визначити стійкість конструкції до впливу автомобільних рідин і зовнішніх чинників. До таких випробувань належать перевірки на дію води та сольових розчинів, а також тестування в умовах значних температурних коливань у діапазоні від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

У таблиці 3.1 наведено порівняльну оцінку трьох варіантів конструкції спойлера за низкою факторів, серед яких маса виробу, тривалість складання, собівартість, рівень шуму, експлуатаційні характеристики, надійність,

кількість складових елементів, зручність технічного обслуговування, міцність та зовнішній вигляд. Врахування вагомості кожного критерію у відсотках дало змогу визначити сумарний показник ефективності для кожного з варіантів, за яким найкращим виявився дизайн «В».

Додатково проводяться термоциклічні випробування, що імітують багаторазову зміну температурних режимів під час експлуатації. Результати тестів, виконаних за умов екстремально низьких і високих температур, а також випробувань на ударну дію каміння чи інших твердих частинок, дозволяють оцінити експлуатаційну надійність, міцність і стабільність роботи спойлера в реальних дорожніх умовах.

3.2 Геометричні параметри спойлера.

Для виготовлення заднього спойлера застосовується композиційний матеріал на основі скловолокна та поліефірної смоли (рис. 3.1). Експлуатаційні характеристики композитів значною мірою залежать від їхньої хімічної та механічної взаємодії між складовими компонентами. Армувальний наповнювач, зокрема волокно, забезпечує виробу необхідну міцність і жорсткість, тоді як матричний матеріал формує загальну структуру композиту, підвищує його стійкість до впливу навколишнього середовища та сприяє рівномірному розподілу навантажень.

Скловолоконні матеріали отримують шляхом поєднання кількох різних компонентів з метою досягнення оптимального поєднання фізико-механічних властивостей. У даному випадку як основний конструкційний елемент використовується композит, армований волокнами типу Е-скло. Цей матеріал виготовляється з безперервних скляних ниток, які об'єднуються в пряжу або тканину. Він характеризується невеликою масою, достатньою міцністю на розтяг і стиск, а також високою розмірною стабільністю.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Завдяки поєднанню малої ваги та задовільних міцнісних показників Е-скловолокно широко застосовується у виробництві деталей автомобільного кузова, зокрема задніх спойлерів. Матеріал має хороші електроізоляційні властивості та забезпечує гнучкість під час конструювання виробів складної форми, що позитивно впливає на їхню експлуатаційну ефективність. Такі характеристики роблять його придатним для використання в умовах, де необхідне поєднання міцності, довговічності та високого питомого електричного опору.

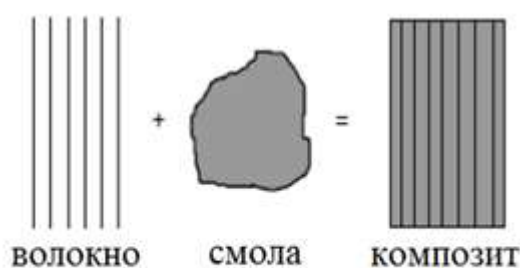


Рисунок 3.1 – Композитне утворення.

Крім того, скловолокно відзначається низьким рівнем вологопоглинання та стійкістю до дії більшості агресивних середовищ, зокрема солоної води й кислотних опадів. Це забезпечує тривалий термін служби виробів і зменшує ризик їх передчасного руйнування. Матеріал легко піддається формуванню у складні геометричні конфігурації, що дає змогу скоротити тривалість складання, зменшити обсяг механічної обробки та знизити загальні витрати на виробництво.

У таблицях 3.2 і 3.3 наведено основні хімічні та механічні характеристики Е-скловолокна, які враховуються під час проектування та виготовлення композитного заднього спойлера.

Конструктивне виконання та геометрична форма заднього спойлера узгоджені з аеродинамічним профілем типу НАСА, що забезпечує покращення його аеродинамічних характеристик. Загальна довжина виробу

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

становить 1400 мм. Спойлер спроектовано як елемент із пружним кріпленням, який розміщується безпосередньо під опорною частиною або стійками, що фіксують його на кузові автомобіля.

Таблиця 3.2 – Хімічні властивості Е-скловолокна.

SiO ₂ %	52–56
B ₂ O ₃ %	5–10
Al ₂ O ₃ %	12–16
MgO %	0–5
CaO %	16–25
Na ₂ O+K ₂ O %	0–2
ZnO %	2–5
Fe ₂ O ₃ %	0–0,8
TiO ₂ %	0–4

Пружинний механізм виконує функцію допоміжного кріплення і сприяє автоматичній зміні положення спойлера під час керування кутом атаки. Зокрема, при натисканні відповідної кнопки відбувається збільшення або зменшення кута нахилу, що дозволяє адаптувати роботу аеродинамічного елемента до різних режимів руху транспортного засобу.

Основні габаритні параметри заднього спойлера наведені в таблиці 3.4. Виріб має довжину 1400 мм, ширину 206,9 мм та товщину 25,8 мм. Відстань між двома опорними стійками становить 804,5 мм, тоді як їхня висота дорівнює 48,2 мм.

Для підвищення жорсткості конструкції та зменшення її маси передбачено використання стільникового заповнювача як внутрішнього шару сендвіч-панелі. Зокрема, застосовується сердечник типу NH-09, який характеризується малою густиною, високою питомою жорсткістю та достатньою довговічністю. Стільникова структура забезпечує ефективний

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

розподіл навантажень і підвищує загальну міцність виробу без істотного збільшення його ваги.

Таблиця 3.3 – Механічні властивості Е–скловолокна.

Щільність (г/см ³)	2,58
Міцність на розрив (МПа) при 23 °С	3445
Міцність на розрив (МПа) при 196 °С	5310
Міцність на розрив (МПа) при 538 °С	1725
Міцність на розрив (МПа) при 371 °С	2620
Модуль пружності (ГПа) при 538 °С	81,3
Модуль пружності (ГПа) при 23 °С	72,3
Відносне видовження %	4,8

Стандартна густина комірчастого матеріалу, що використовується в автомобільній галузі, становить приблизно 32 кг/м³ згідно з технічними характеристиками виробника та особливостями технології виготовлення.

Повне конструкторське опрацювання спойлера виконується відповідно до заданих розмірів із використанням системи автоматизованого проєктування SolidWorks (рисунки 3.2 та 3.3). У кресленнях детально відображаються геометричні параметри виробу, вибрані матеріали та їхні основні технічні властивості.

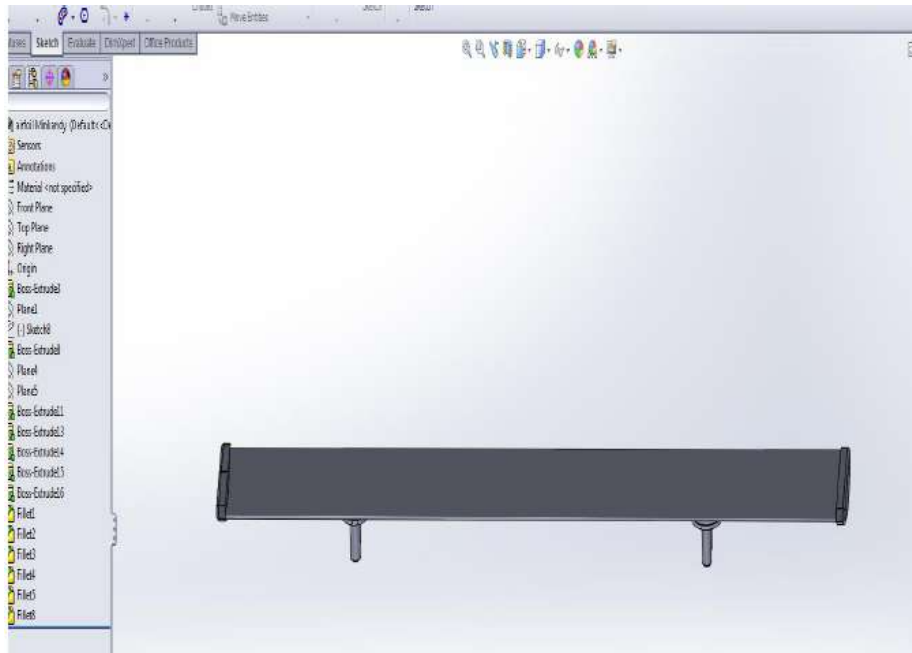


Рисунок 3.2 – Модель в «Solidworks».

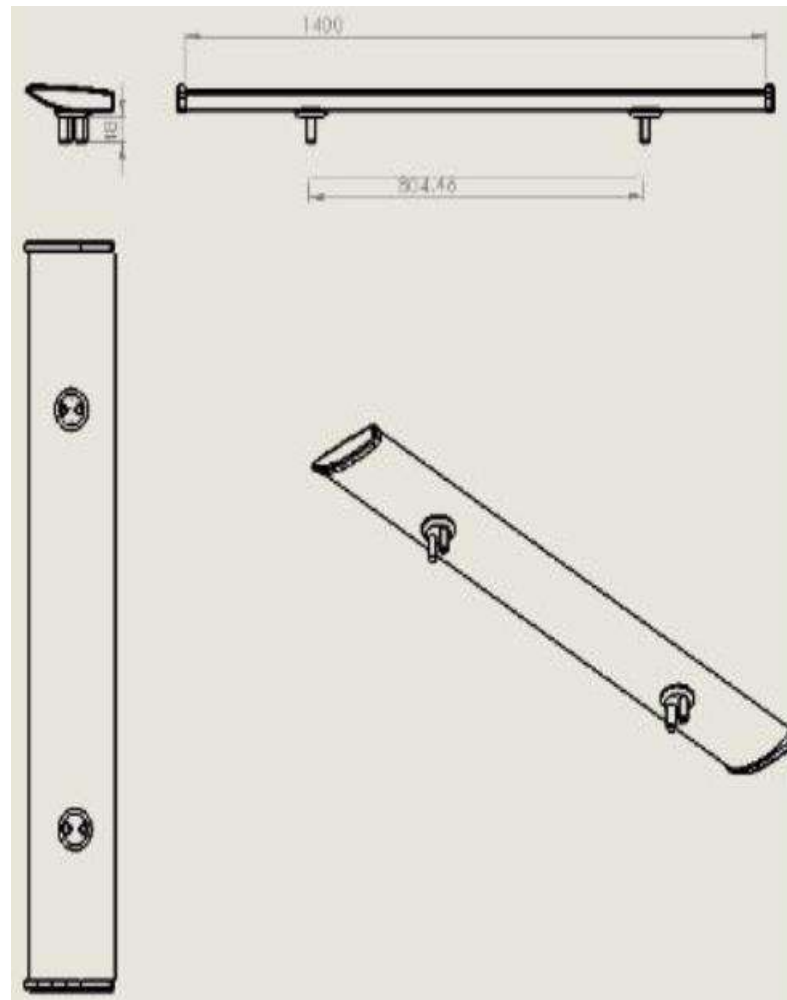


Рисунок 3.3 – Геометрія спойлера.

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

3.3 Технологія виготовлення.

Виготовлення заднього спойлера здійснюється методом вакуумної інфузії, який передбачає введення полімерної смоли у волокнистий ламінат під дією різниці тисків. У цьому процесі вакуум створює знижений тиск з одного боку пакета армувального матеріалу, тоді як атмосферний тиск сприяє просуванню смоли крізь шари скловолокна, забезпечуючи їх рівномірне просочення.

Інтенсивність просочення та швидкість поширення смоли в товщі матеріалу залежать від кількох технологічних параметрів. Зокрема, швидкість інфузії зростає зі збільшенням проникності волокнистого пакета та градієнта тиску, що діє на смолу, і зменшується зі зростанням її в'язкості. Таким чином, правильний підбір смоляної системи та оптимізація режимів вакуумування мають вирішальне значення для отримання якісного композитного виробу.

Формоутворююча оснастка складається з двох частин – матриці та пуансона, які утворюють замкнений об'єм для формування виробу. Використання вакуумної інфузії дозволяє досягти більшого вмісту армувального волокна у порівнянні з ручним формуванням, а також отримати ламінат із меншою кількістю порожнин і кращими механічними характеристиками.

Під час підготовки форми застосовується розділювальний склад, наприклад типу Chemlease 75, який полегшує вилучення готової деталі та запобігає її прилипанню до поверхні оснастки. Далі укладається відривний шар і розділювальна плівка, поверх яких розміщується дренажний або поточний матеріал, що створює канали для рівномірного розподілу смоли. Перед початком інфузії вакуумні та смоляні магістралі ретельно перевіряються на герметичність, щоб уникнути підсмоктування повітря.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після завершення укладання матеріалів обидві частини форми з'єднуються та фіксуються.

- Підготовка ламінату.

Матриця виготовляється відповідно до кривизни аеродинамічного профілю спойлера. Структура ламінату формується таким чином, щоб забезпечити симетричне розташування волокон відносно середньої площини. Для даної конструкції обрано чотиришарову схему укладання з орієнтацією волокон [0/+45/90], що дозволяє підвищити жорсткість виробу в різних напрямках навантаження. Підготовлений напівпрофіль спойлера розміщується у формі, геометрія якої повністю відповідає його зовнішнім обрисам.

Для оцінювання жорсткісних характеристик композитного матеріалу використовується правило сумішей із урахуванням коефіцієнта орієнтації волокон (коефіцієнта Кренхеля). У цьому випадку модуль пружності композиту залежить від модулів Юнга армувального волокна та матриці, а також від їх об'ємних часток у структурі матеріалу.

Ефективність армування визначається з урахуванням кута укладання волокон. Для ламінату з орієнтацією [0/+45/90] коефіцієнт ефективності в напрямку осі X становить: $(0,65 \times 1) + (0,35 \times 0,25) = 0,7375$

У напрямку осі Y цей показник дорівнює: $(0,65 \times 0) + (0,35 \times 0,25) = 0,0875$

Отримані значення свідчать про значно більшу жорсткість конструкції у поздовжньому напрямку порівняно з поперечним. Це необхідно враховувати під час прогнозування еквівалентного модуля Юнга композитного ламінату в площині X–Y, що дозволяє оцінити його поведінку під дією експлуатаційних навантажень.

- Приготування смоляної системи.

У процесі виготовлення ламінату використовується поліефірна смола, властивості якої розглянуто у попередньому розділі. Для даної технології

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

обрано імпортований матеріал марки R 10-03, що належить до ортофталевих поліефірних смол і характеризується підвищеною жорсткістю після полімеризації. З метою зниження в'язкості та покращення здатності смоли проникати у волокнисту структуру до її складу вводиться мономер стиролу.

Для ініціювання процесу тверднення до смоляної системи додається затверджувач у визначеній пропорції. Це забезпечує протікання реакції зшивання полімерних ланцюгів, унаслідок чого формується більш жорстка та міцна структура композитного ламінату. Правильне дотримання співвідношення компонентів є важливим для отримання стабільних механічних характеристик готового виробу.

- Процес ламінування.

Підготовлений напівпрофіль спойлера з попередньо заданою орієнтацією волокон покривається спеціальною плівкою, яка полегшує подальше відокремлення сформованого ламінату від оснастки. Поверх неї укладається розділювальна плівка, що виконує функцію каналу для вільного переміщення смоли. Далі на конструкцію розміщується дренажний або потокорозподільний матеріал, який сприяє рівномірному просоченню всіх шарів армувального пакета.

Після завершення укладання ламінат герметизується вакуумним пакетом, краї якого ретельно фіксуються клейкою стрічкою. У систему під'єднуються вхідні та вихідні трубопроводи для подачі смоли й відведення повітря, що забезпечує створення необхідного вакуумного середовища. На наступному етапі пуансон («чоловіча» частина форми) встановлюється у матрицю («жіночу» частину), що дозволяє остаточно сформувати замкнений об'єм виробу.

Після цього смола обережно подається у форму та рівномірно розподіляється по всій довжині профілю. Увімкнення вакууму запускає процес інфузії, під час якого відбувається повне просочення волокон і формування композитної структури. Після завершення полімеризації

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проводяться операції механічної обробки — шліфування поверхні та обрізання надлишкових матеріалів, що дозволяє надати деталі остаточних геометричних розмірів і необхідної якості поверхні.

3.4 Визначення притискної сили спойлера.

Згідно з теорією аеродинаміки профілів крила, підйомна сила визначається залежністю, що враховує густину повітряного потоку, швидкість обтікання та коефіцієнт підйомної сили. Оскільки задній спойлер автомобіля створює силу, спрямовану донизу, тобто протилежну підйомній, її можна розглядати як від'ємну підйомну силу або притискну силу.

У загальному випадку величина притискної сили залежить від густини повітря, швидкості руху транспортного засобу та аеродинамічного коефіцієнта підйому. Для розрахунків приймається швидкість повітряного потоку над спойлером 150 км/год (що відповідає приблизно 42 м/с) і кут атаки 8° . За цих умов коефіцієнт підйомної сили можна визначити за лінійною залежністю від кута атаки, вираженого в радіанах. Перехід у радіани дає значення близько 0,14 рад.

При великих швидкостях обтікання можливе явище зриву потоку, яке виникає в прикордонному шарі через запізнення руху частинок повітря відносно поверхні профілю. Це впливає на зміну аеродинамічних характеристик і повинно враховуватися під час оцінювання ефективності роботи спойлера.

Оскільки при боковому огляді профіль спойлера наближено має еліптичну форму, площу його проєкції можна визначити за відповідною геометричною формулою. Для спойлера з розмахом 1,4 м та хордою 0,2069 м площа становить приблизно $0,91 \text{ м}^2$. За стандартних атмосферних умов густина повітря приймається рівною $1,184 \text{ кг/м}^3$. Підставивши ці значення у

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розрахункові залежності, отримують величину притискної сили, що діє на конструкцію.

Для визначення характеру повітряного потоку додатково розраховується число Рейнольдса. За температури близько 25 °С кінематична в'язкість повітря становить приблизно $(1,5 \cdot 10^{-5})$ м²/с. З урахуванням довжини хорди спойлера 0,2069 м отримане значення числа Рейнольдса свідчить про турбулентний режим обтікання, що підтверджується графічною залежністю коефіцієнта підйомної сили від кута атаки.

Максимальне навантаження на спойлер визначається виходячи з дії рівномірно розподіленої притискної сили, величина якої становить близько 829,6 Н. У такому випадку конструкцію можна розглядати як балку, що спирається на дві опори. Розрахунок напружень у поперечному перерізі здійснюється з урахуванням прикладеної сили, відстані між опорами, положення нейтральної осі, ширини та товщини профілю.

При аналізі поперечного перерізу спойлера найближчим геометричним наближенням вважається суцільний еліптичний переріз. Механічна жорсткість такого елемента визначається його моментом інерції відносно центроїда. Цей параметр безпосередньо впливає на здатність конструкції чинити опір згинальним і крутильним навантаженням.

Крутильна жорсткість еліптичного профілю розраховується з урахуванням модуля зсуву матеріалу, з якого виготовлено спойлер, у даному випадку Е-скловолокна. Отримане значення жорсткості на кручення становить приблизно $(3,41 \cdot 10^{17})$ Н·мм/рад, що свідчить про достатню опірність конструкції деформаціям під дією аеродинамічних навантажень.

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.5 Аналіз НДС спойлера МКЕ.

Характер обтікання автомобіля повітряним потоком може бути як ламінарним, так і турбулентним, що визначається передусім швидкістю руху транспортного засобу. Для прогнозування аеродинамічних параметрів спойлера використано математичну модель двовимірного стаціонарного потоку нестисливої рідини, яка ґрунтується на рівняннях неперервності та імпульсу. У розрахунках застосовано турбулентну модель, що широко використовується для опису енергетичних характеристик турбулентних потоків.

У цій моделі змінна характеризує турбулентну кінетичну енергію потоку, тоді як параметр описує швидкість її дисипації. Сукупність цих величин дозволяє оцінити інтенсивність турбулентних пульсацій і втрати енергії в прикордонному шарі, що безпосередньо впливає на аеродинамічну ефективність спойлера.

Числове моделювання напружено-деформованого стану конструкції виконувалося в середовищі Nastran. Об'єкт дослідження – спойлер, геометрія якого відповідає чотиризначному аеродинамічному профілю NACA з тонким вигнутим перерізом. Програмний комплекс Nastran, розроблений із використанням мови програмування FORTRAN, призначений для проведення інженерних розрахунків і моделювання складних науково-технічних задач.

Метод скінченних елементів, покладений в основу розрахунків, забезпечує чисельне наближення розв'язків диференціальних рівнянь у частинних похідних шляхом дискретизації суцільної області на окремі елементи. Такий підхід дозволяє мінімізувати похибку обчислень і отримати стійке рішення для складних конструкційних систем.

У процесі аналізу до спойлера прикладалося рівномірно розподілене навантаження, яке відповідало максимальній розрахунковій притискній силі -

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

829,6 Н. За цих умов максимальні еквівалентні напруження в конструкції становили 2,309 МПа, а величина переміщення – 4,451 мм. Додатково було проведено серію розрахунків для менших значень навантаження в діапазоні від 700 Н до 100 Н. Отримані результати, що відображають залежність напружень і переміщень від прикладеної сили, наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.4 – Дані моделювання Nastran спойлера.

Притискна сила (Н)	Напруження (МПа)	Об'єм (мм)
829,614	2,309	4,451
700	1,949	3,755
600	1,670	3,219
500	1,392	2,682
400	1,113	2,146
300	0,835	1,609
200	0,557	1,073
100	0,278	0,536

Моделювання виконувалося шляхом експорту тривимірної моделі спойлера, створеної в середовищі SolidWorks, у формат IGES. У програмі Nastran для подальшого аналізу було сформовано просторову скінченно-елементну сітку, яка складалася з тетраедричних елементів. Сітка покривала всю геометрію виробу та забезпечувала достатню точність розрахунків.

Перед прикладанням рівномірного навантаження на ділянках розташування опор було задано жорстке закріплення, що імітує реальні умови встановлення спойлера на кузові автомобіля. На рисунку 3.4 наведено вигляд скінченно-елементної моделі з відповідними граничними умовами. Розподіл максимальних напружень у конструкції та поле переміщень при дії найбільшої притискної сили показано на рисунках 3.5 і 3.6 відповідно.

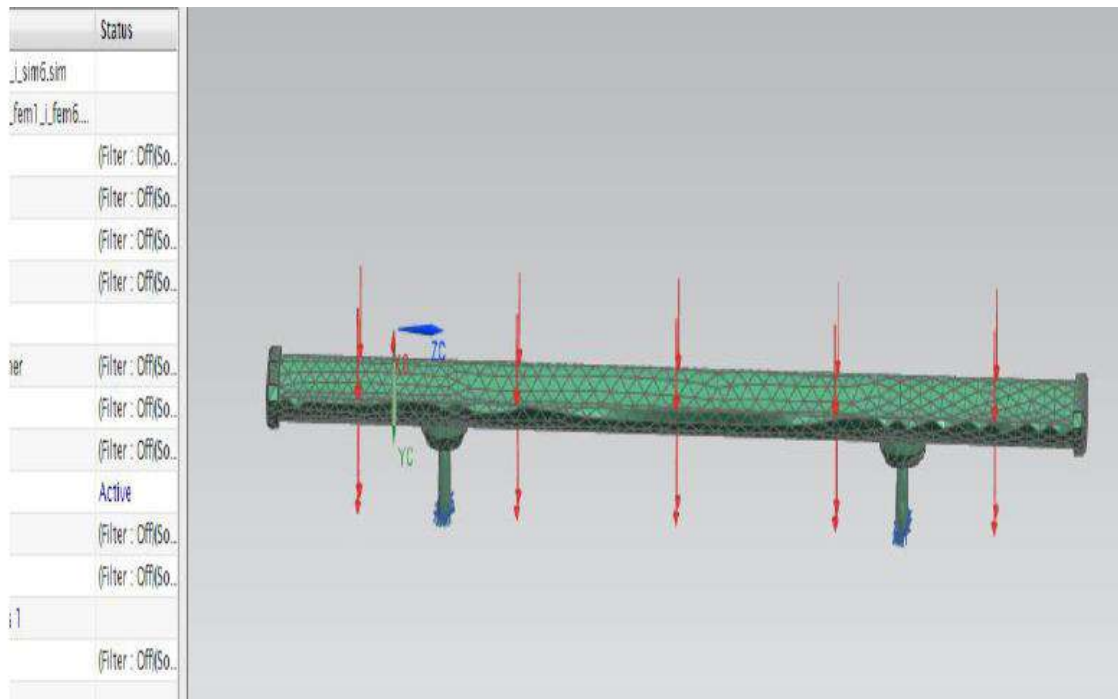


Рисунок 3.4 – Умови обмежень та навантаження рівномірне.

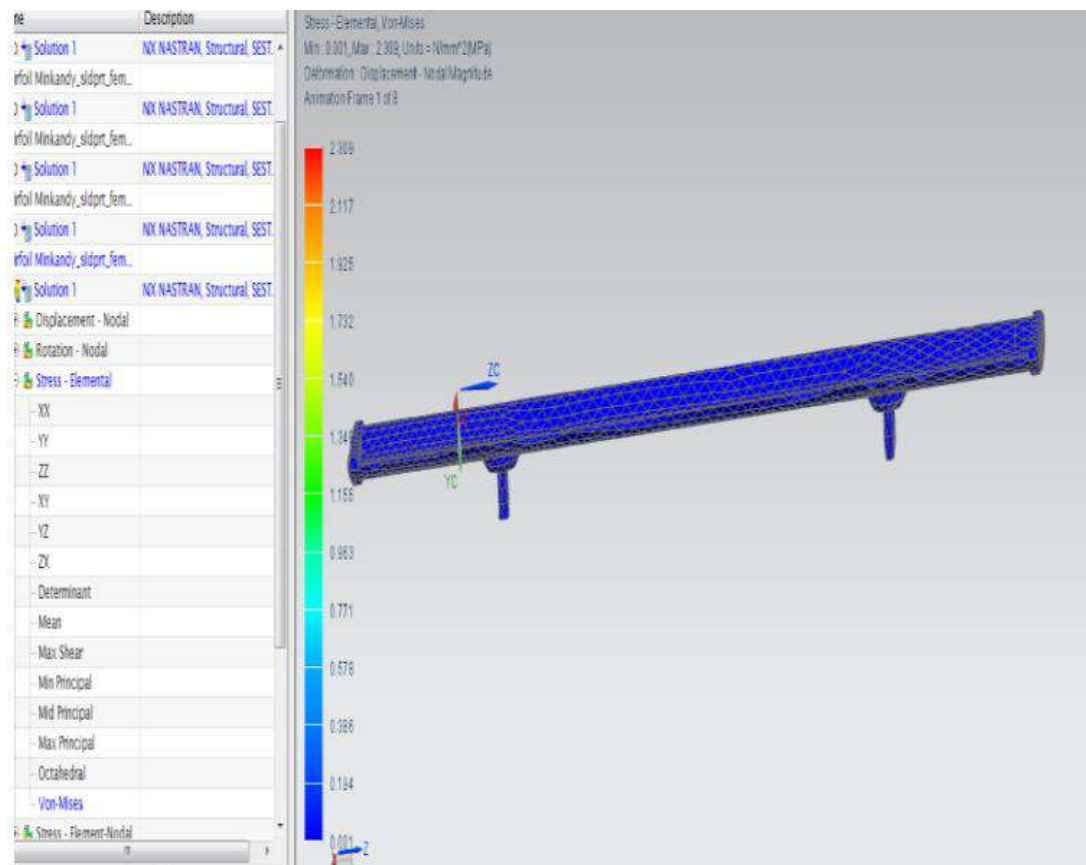


Рисунок 3.5 – Розподіл напружень за максимальної притискної сили.

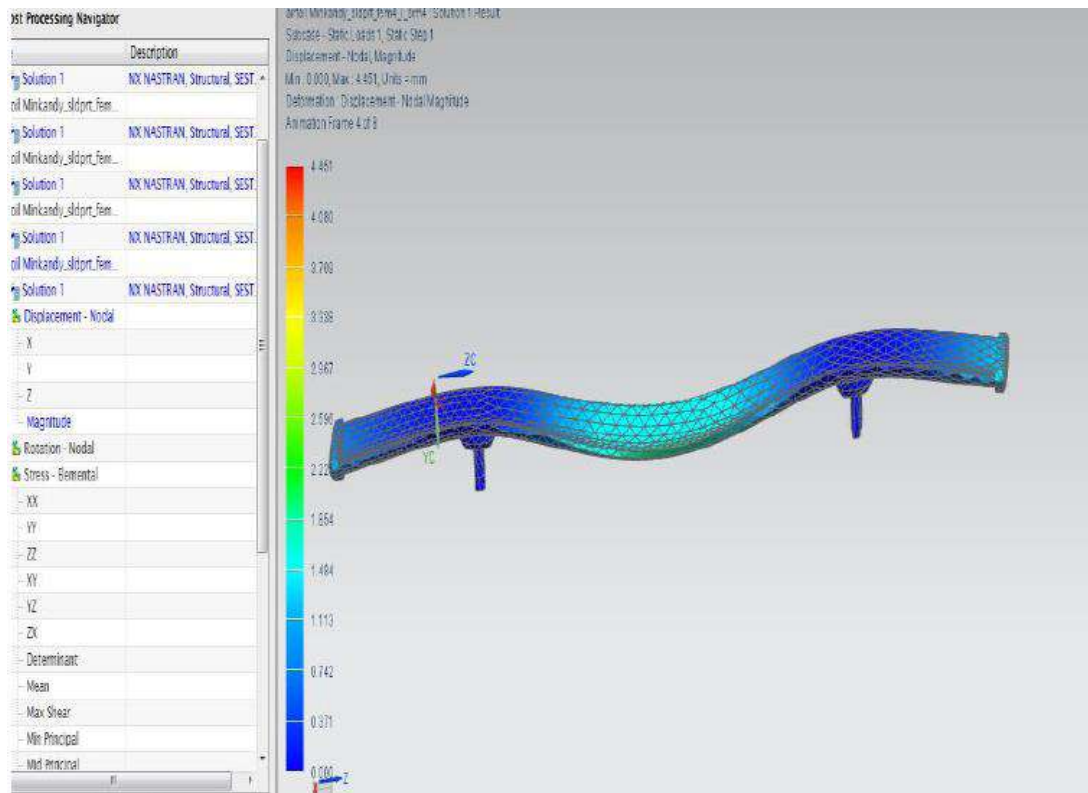


Рисунок 3.6 – Розподіл переміщень спойлера за максимальної притискної сили.

На графічній залежності (рис. 3.7) відображено взаємозв'язок між величиною притискної сили та напруженнями, що виникають у конструкції спойлера.

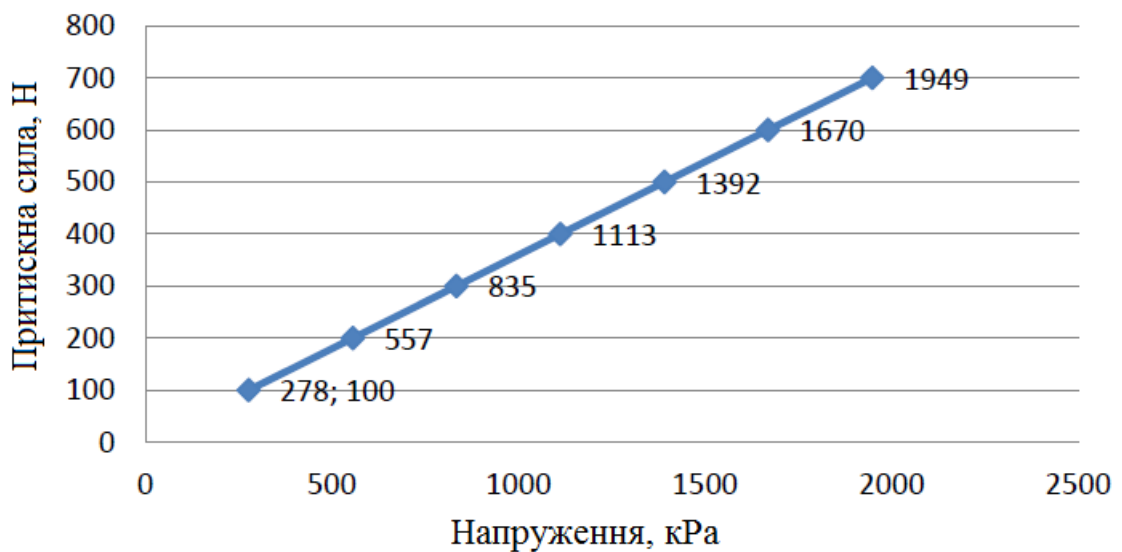


Рисунок 3.7 – Взаємозв'язок між величиною притискної сили та напруженнями.

Отримані результати свідчать про майже лінійний характер цієї залежності: зі зростанням притискної сили пропорційно збільшується рівень навантаження, яке сприймає композитний елемент.

Встановлено, що величина притискної сили визначається швидкістю повітряного потоку, який обтікає аеродинамічний профіль, а також перепадом тиску між верхньою та нижньою поверхнями спойлера. Саме ця різниця тисків формує зовнішнє навантаження на композитну конструкцію зі скловолокна, що входить до складу заднього спойлера.

Товщина ламінату визначається наступним чином. Задній спойлер виконано у вигляді сендвіч-конструкції з використанням стільникового осердя. З огляду на те, що верхня частина виробу за формою наближена до прямокутної балки, для визначення необхідної товщини ламінату застосовано відповідні розрахункові залежності для сендвіч-панелей (рис. 3.8).

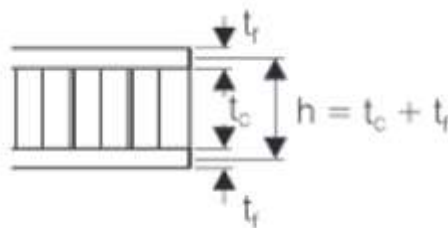


Рисунок 3.8 – Товщина волокна сендвіч-панелі.

Момент інерції прямокутного перерізу визначається стандартною формулою, після чого він підставляється у рівняння для розрахунку напружень у зоні опор. З урахуванням конструктивної особливості сендвіч-панелі загальна висота елемента розглядається як сума товщини осердя та товщини зовнішніх армувальних шарів. Це дозволяє отримати узагальнений вираз для визначення необхідної товщини ламінату.

Після спрощення розрахунків і розв'язання відповідного квадратного рівняння встановлено, що товщина композитного облицювального шару становить приблизно 0,51 мм. Це значення відповідає різниці між загальною

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

товщиною профілю спойлера та товщиною стільникового осердя, що підтверджує правильність прийнятих конструктивних рішень.

Результати орієнтовного економічного оцінювання витрат на виготовлення заднього спойлера подано в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Розподіл орієнтовної вартості виготовлення спойлера.

№	Предмети	Одиниця	Сума	Вартість одиниці (\$)	Загальна вартість (\$)	Примітка
1	Скловолокно	м ²	5	2,0	10	
2	Поліефірна смола	кг	2	4	8	
3	Стільниковий NH-09	м ³	1	44,00	44,00	
4	Смоляні труби	м	4	0,17	0,68	
5	Затверджувач	кг	1	4	4	
6	Матова плівка	м ²	2	0,5	1	
7	Мономер стиролу	кг	1	5	5	10 %
8	Відпускна плівка	рулон	1	7,8	7,8	
9	Фіксована вартість праці	номер	2	2*20	40	
Оцінка загальної вартості				120,48		

Вони враховують витрати на матеріали, технологічні операції та допоміжні процеси, пов'язані з виробництвом композитної конструкції.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано механізм утворення притискної сили, яка виникає внаслідок різниці тисків у повітряному потоці навколо аеродинамічних елементів, зокрема спойлера. Показано, що раціональна форма профілю дозволяє змінювати напрямок і швидкість повітряного потоку, забезпечуючи покращення зчеплення коліс із дорожнім покриттям та підвищення стійкості автомобіля на високих швидкостях.

2. Розрахунки виконувалися з урахуванням прийнятих припущень щодо геометричних параметрів спойлера, кута атаки 8° та швидкості повітряного потоку 150 км/год. За цих умов визначено максимальну притискну силу, що становить 829,6 Н. Отримане значення було використано для аналізу напружено-деформованого стану конструкції, у результаті чого встановлено максимальні напруження на рівні 2,309 МПа.

3. У роботі запропоновано технологію виготовлення композитного спойлера із скловолокна шляхом застосуванням вакуумної інфузії. Конструкція виробу виконана у вигляді легкої армованої сендвіч-системи, що забезпечує необхідну жорсткість і міцність. Визначена товщина облицювальних шарів ламінату, яка становить приблизно 0,51 мм, є достатньою для сприйняття розрахункових навантажень, спричинених дією притискної сили.

4. Додатковий числовий аналіз проведено для діапазону притискних сил від 100 Н до 700 Н. Отримані результати підтверджують наявність залежності між величиною притискної сили, швидкістю повітряного потоку та перепадом тиску на поверхнях спойлера. Саме ці фактори формують рівень напружень у композитному матеріалі зі скловолокна, що визначає експлуатаційну надійність і працездатність заднього аеродинамічного елемента.

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аеродинаміка літальних апаратів [Електронний ресурс] : навч. посіб. Для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Літаки і вертольоти» спец. 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: П. В. Лук'янов. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 188 с.

2. Тягній В. Г. Основи аеродинаміки та динаміки польоту. Частина I. Аерогідрогазодинаміка / В. Г. Тягній, В. В. Ємець ; МВС України, Харків. нац. ун-т внутр. справ, Кременчуцьк. льотний коледж. – Харків : ХНУВС, 2023. – 280 с.

3. Лемко О.Л. Навчальний посібник «Аеродинамічні характеристики транспортних літаків та їх розрахунок». Електронне навчальне видання. Київ: НТУУ «КПІ», 2012. - 75 с.

4. Sunanda, M. & Nayak, S., 2013. Analysis of NACA 2412 for Automobile Rear Spoiler Using Composite Material. Internal Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, January, 3(1), pp. 236-242.

5. Rubel Chandra Dasa, Mahmud Riyada, " CFD Analysis of Passenger Vehicle at Various Angle of Rear End Spoiler", Khulna, Bangladesh. Procedia Engineering 194 (2017) 160 – 165.

6. See-Yuan Cheng, Kwang-Yhee Chin, Shuhaimi Mansor, Abd Basid Abd Rahman, "Experimental study of yaw angle effect on the aerodynamic characteristics of a road vehicle fitted with a rear spoiler" Melaka, Malaysia. JWEIA 184 (2019) 305–312.

7. Sambit Majumder and Somnath Saha, A Method of Drag Reduction of a Vehicle by Computational Investigation and Geometric Modification, International Journal of Applied Engineering Research, ISSN 0973-4562 Volume 9, Number 6 (2014) pp. 687-699.

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

8. Технологія композиційних матеріалів: Навчальний посібник /Гончаренко В.В., Коваленко І.В. –К.:, 2007.-131 с.

9. Верещака С. М. Механіка композиційних матеріалів : навчальний посібник / С. М. Верещака. – Суми : Сумський державний університет, 2013. – 160 с.

10. Композиційні матеріали: Навчальний посібник / Копань В.С – К.: «Пульсари», 2004 – 200 с.

11. A. Terry Bahill, Clark Briggs. The Systems Engineering Started in the Middle Process: A Consensus of Systems Engineers and Project Managers. May 2001 Systems Engineering 4(2): pp. 156 – 167.

12. Bagherpour, S., 2012. Material Science Polymer. Fiber Reinforced Polyester Composites, 26 September, p. Chapter 6. pp. 133 – 141.

					КВРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					КвРМТВА. 22098.01.22.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59