

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ
ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Кафедра технології виробництва літальних апаратів

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

Тема: «Конструкція, технологія та оснащення виготовлення антикрила
автомобіля»

Виконав: студент гр. АТ-21

Удод О.О

підпис

Керівник: Лаврієнков А.Д.

підпис

Київ - 2026

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

<i>№ з/п</i>	<i>Формат</i>	<i>Позначення</i>	<i>Найменування</i>	<i>Кількість листів</i>	<i>Примітка</i>
1	A4		<i>Завдання на дипломний проект</i>	2	

				<i>ДП.АТ2120.06.000.000</i>		
	<i>ПІБ</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розробн.</i>	<i>Удовд О.О.</i>			<i>Відомість дипломного проекту</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Керібн.</i>	<i>Лавріненко А.Д.</i>				1	1
<i>Консульт.</i>					<i>НН ММІ к.ТВ/А КПІ ім. Ігоря Сікорського</i>	
<i>Н/контр.</i>						
<i>Заб.каф.</i>	<i>Лавріненко А.Д.</i>					

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут

Кафедра технології виробництва літальних апаратів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Антон ЛАВРІНЕНКОВ

« ____ » _____ 2026 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку підготовки _____ 131 «Прикладна механіка»

**на тему: «Конструкція, технологія та оснащення виготовлення антикрила
автомобіля»**

Виконав (-ла): студент 4 курсу, групи АТ-21

(шифр групи)

_____ Удод Олексій Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник зав. каф., к.т.н., доц. Лавріненко Антон Дмитрович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ - 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут Навчально-науковий механіко-машинобудівний

кафедра Технології виробництва літальних апаратів

Рівень вищої освіти - перший (бакалаврський)

Спеціальність - 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма «Технології виробництва літальних апаратів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Антон ЛАВРІНЕНКОВ

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Удоду Олексію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту: «Конструкція, технологія та оснащення виготовлення антикрила автомобіля»

керівник проекту _____ Лавріненко Антон Дмитрович, доцент, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «01» червня 2026 р. №2019-с

2. Термін подання студентом проекту 16.06.26

3. Вихідні дані до проекту: 3D модель автомобіля

4. Зміст пояснювальної записки: 1) огляд інформаційних та літературних джерел; 2) вибір матеріалу антикрила; 3) розробка конструкції антикрила та його кріплення до автомобіля; 4) скінчено-елементне моделювання; 5) технологічний розділ; 6) технологічна оснастка для виготовлення антикрила

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): результати скінчено-елементного моделювання, конструкторська технологічної оснастки

6. Консультанти розділів проекту*

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

7. Дата видачі завдання 23.04.26

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Огляд інформаційних та літературних джерел	23.04-05.05	
2	Вибір матеріалу антикрила	23.04-26.04	
3	Розробка конструкції антикрила та його кріплення до автомобіля	27.04-15.05	
4	Скінчено-елементне моделювання	16.05-25.05	
5	Технологічний розділ	26.05-31.05	
6	Технологічна оснастка для виготовлення антикрила	01.06-16.06	

Студент

Олексій УДОД

Керівник

Антон ЛАВРІНЕНКОВ

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту

на тему: «Конструкція, технологія та оснащення виготовлення
антикрила автомобіля»

Анотація

Дипломний проєкт присвячено розробленню заднього антикрила та системи його кріплення для спортивного автомобіля, підготовленого до участі у змаганнях класу «тайм-атак». Актуальність роботи пов'язана з необхідністю підвищення притискної сили на задній осі без застосування активних аеродинамічних механізмів, заборонених регламентом змагань.

Виконано аналіз існуючих конструкцій антикрил, способів їх кріплення та регламентних обмежень. Обґрунтовано використання вуглепластикового крила з регульованим кутом установлення та двоступеневою стійковою системою передавання навантаження на силову структуру кузова. Визначено геометричні параметри крила, обрано аеродинамічний профіль, розраховано очікувану притискну силу та проведено чисельне моделювання аеродинаміки. За отриманими навантаженнями розраховано елементи кріплення та оптимізовано їх конструкцію методом топологічної оптимізації для зменшення маси при збереженні жорсткості та міцності.

Розроблено технологію виготовлення композитних деталей антикрила: основний профіль формується за безматричною схемою на пінному осерді з використанням Mylar-плівки та вакуумного ущільнення пакета, а торцеві пластини виготовляються методом вакуумної інфузії. Обрано схему армування та запропоновано маршрут виготовлення металевих елементів кріплення.

Результатом проєкту є комплект конструкторсько-технологічних рішень, тривимірних моделей і креслень, які забезпечують підвищення зчеплення задньої осі автомобіля, стабільність руху на високих швидкостях і практичну можливість виготовлення конструкції.

Ключові слова: антикрило, аеродинамічний притиск, чисельне моделювання, топологічна оптимізація, вуглепластик, вакуумна інфузія, безматричне формування, тайм-атак.

Annotation

This diploma project deals with the design of a rear wing and its mounting system for a sports car that is prepared for Time Attack racing. The work is important because the car needs more downforce on the rear axle, and the competition rules do not allow active (moving) aerodynamic parts.

First, existing rear wings, their mounting types and the main regulatory limits were studied. A carbon-fibre wing with an adjustable mounting angle and a two-stage truss mount was chosen; this mount transfers the load to the strong parts of the car body. The size of the wing was set, an aerodynamic profile was selected, the expected downforce was calculated, and the airflow was modelled on a computer. Using these loads, the mounting parts were calculated, and their shape was improved by topology optimisation to make them lighter while keeping them stiff and strong.

A manufacturing process for the composite parts was developed. The main wing profile is made without a mould: it is built on a foam core, covered with Mylar film, and pressed together under vacuum. The endplates are made by vacuum infusion. A reinforcement (layup) scheme was chosen, and a production route for the metal mounting parts was proposed.

The result of the project is a set of design and technology solutions, three-dimensional models and drawings. They help to improve rear-axle grip, keep the car stable at high speed, and make the structure possible to build in practice.

Keywords: rear wing, aerodynamic downforce, numerical simulation, topology optimisation, carbon-fibre composite, vacuum infusion, mouldless fabrication, time attack.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	4
ВСТУП	6
1. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ТА ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	9
1.1. Умови експлуатації автомобіля у змаганнях формату Time Attack.....	9
1.2. Роль заднього антикрила в аеродинамічному балансі автомобіля	11
1.3. Аналіз аеродинамічних профілів для автомобільних антикрил	12
1.4. Аналіз конструкцій задніх антикрил для автомобілів подібного класу	14
1.5. Аналіз способів кріплення антикрила до кузова	16
1.6. Огляд матеріалів і технологій виготовлення антикрил	17
1.7. Патентно-інформаційний пошук аналогів.....	18
1.8. Висновки до першого розділу	19
2. ВИБІР МАТЕРІАЛІВ АНТИКРИЛА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ.....	20
2.1. Основні вимоги та критерії до вибору матеріалів	20
2.2. Індекси Ешбі як попередній матеріалознавчий критерій	22
2.3. Перевірка матеріалів за регламентами FIA Appendix J Article 252	24
2.4. Вибір матеріалу наповнювача основного профілю антикрила	24
2.5. Локальні підсилення, вузли кріплення та закладні	26
2.6. Вибір матеріалу ендплейтів	26
2.7. Вибір матеріалу несучих елементів	27
2.8. Вибір кріпильних елементів	28
2.9. Захист від гальванічної корозії	28
2.10. Відповідність матеріалів нормативним документам та аналоги	29
2.11. Висновки до другого розділу.....	30
3. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ АНТИКРИЛА ТА ЙОГО КРІПЛЕННЯ ДО АВТОМОБІЛЯ	33

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Пояснювальна записка	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розробив		Удод О.О.					1	92
Перевірив		Лавріненков А.Д.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затвердив								
					НН ММІ к. ТВ/А КПІ ім. Ігоря Сікорського			

3.1. Вихідні дані для проєктування	33
3.2. Послідовність аеродинамічного компонування.....	37
3.3. Загальна будова конструкції	39
3.4. Принцип роботи та силова схема конструкції.....	40
3.5. Несучі елементи системи кріплення	41
3.5.1. Нижня балка	41
3.5.2 Верхня поперечина	43
3.5.3. Основні стійки	44
3.5.4. Стійки swan-neck.....	44
3.5.5. Опорні кронштейни та фіксуючі пластини.....	45
3.5.6. Розпірки	46
3.6. Аеродинамічні елементи	47
3.6.1. Основний профіль.....	47
3.6.2. Закладні елементи.....	48
3.6.3. Торцеві пластини (енд-плейти)	49
3.7 Топологічна оптимізація стійок.....	50
3.7.1 Оптимізація основної стійки	51
3.7.2 Оптимізація стійки swan-neck.....	54
4. СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	57
4.4 Граничні умови аеродинамічного розрахунку	59
4.5. Сітка та цілі аеродинамічного моделювання.....	60
4.6. Результати Flow Simulation для чотирьох положень	62
4.7. Порівняння положень і вибір розрахункового кута	65
4.9. Формування розрахункового навантаження на систему кріплення	68
4.10. Скінченно-елементна перевірка міцності силових елементів	69
4.11. Висновки до розділу 4	71
5. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	72
5.2. Технологія виготовлення основного профілю антикрила	73
5.3 Технологія виготовлення торцевих пластин.....	75
5.4. Виготовлення металевих елементів кріплення	76
5.5. Загальне складання та контроль якості	78
5.6. Висновки до розділу 5.....	79

6. ТЕХНОЛОГІЧНА ОСНАСТКА ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ АНТИКРИЛА	80
6.1. Вихідні дані та призначення оснащення	80
6.2. Оснащення для формування основного профілю	81
6.3. Оснащення для вакуумної інфузії торцевих пластин	82
6.4. Оснащення для механічної обробки та свердління	83
6.5. Зварювальний кондуктор для нижньої балки	84
6.6. Складальний стенд для антикрила	85
6.7. Оснащення для контролю якості	86
6.8. Висновки до розділу 6	87
7. ОХОРОНА ПРАЦІ	88
7.1. Загальні положення та нормативна база	88
7.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів	89
7.3. Безпека під час роботи з епоксидною системою та вакуумною інфузією ...	90
7.4. Безпека під час механічної обробки композитних деталей	91
7.5. Безпека під час виготовлення алюмінієвих елементів	92
7.6. Безпека під час зварювання алюмінію	93
7.7. Вентиляція, електробезпека та пожежна безпека	94
7.8. Засоби індивідуального захисту	95
7.9. Поводження з хімічними матеріалами та відходами	96
7.10. Висновки до розділу 7	97
ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ	98

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

CAD - система автоматизованого проектування (Computer-Aided Design)

CFD - обчислювальна гідрогазодинаміка (Computational Fluid Dynamics)

CFRP - вуглецевий пластик, армований вуглецевим волокном (Carbon Fibre Reinforced Polymer)

CNC (ЧПК) - числове програмне керування

FAU - Автомобільна Федерація України

FIA - Міжнародна автомобільна федерація (Fédération Internationale de l'Automobile)

FWD - передній привід (Front-Wheel Drive)

NDT - неруйнівний контроль (Non-Destructive Testing)

RTM - формування просоченням смолою під тиском (Resin Transfer Moulding)

RTR - Всеукраїнська серія перегонів RTR Тайм Атак

TDS - технічна специфікація матеріалу (Technical Data Sheet)

TIG - дугове зварювання вольфрамовим електродом в інертному газі (Tungsten Inert Gas)

Time Attack - дисципліна кільцевих перегонів, у якій результат визначається найкращим часом проходження кола

swan-neck - верхня схема кріплення антикрила ("лебедина шия")

hard point / insert - закладний (підсилювальний) елемент у композитній деталі

peel ply - відривна технологічна тканина

Mylar - поліефірна формоутворювальна плівка

Умовні позначення фізичних величин

$D_{\text{пр}}$ - притискна (вертикальна) аеродинамічна сила, Н

F_z - вертикальна складова аеродинамічної сили, Н

F_x - поздовжня складова сили (сила опору), Н

					ДПАТ2120.06.000.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

$D_{розр}$ - розрахункова вертикальна сила з урахуванням коефіцієнта перевантаження, Н

$F_{хрозр}$ - розрахункова поздовжня сила, Н

E_a - умовна аеродинамічна ефективність положення (відношення притиску до опору)

$C_{пр}$ (C_L) - коефіцієнт притискної (підіймальної) сили

C_x (C_D) - коефіцієнт аеродинамічного опору

V - швидкість набігаючого потоку, м/с

ρ - густина повітря, кг/м

q (q_p) - динамічний тиск повітряного потоку, Па

S ($S_{кр}$) - розрахункова площа крила в плані, м

b - ширина (розмах) анти-крила, м

c - хорда профілю, м

k - коефіцієнт перевантаження

$\sigma_{стиск}$ - границя міцності матеріалу на стиск, МПа

$E_{стиск}$ - модуль пружності при стиску, МПа

$\tau_{зсув}$ - границя міцності на зсув, МПа

$G_{зсув}$ - модуль зсуву, МПа

R_m - тимчасовий опір (границя міцності), МПа

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Аеродинамічні елементи кузова є одним із засобів підвищення стабільності автомобіля під час руху з високою швидкістю у кільцевих перегонах і змаганнях формату Time Attack (дисципліна кільцевих перегонів, у якій результат визначається не позиційною боротьбою на трасі, а найкращим часом проходження кола). Створювана ними притискна сила збільшує нормальне навантаження на шини без збільшення статичної маси автомобіля, що дає змогу підвищити запас зчеплення у поворотах та під час інтенсивного гальмування [1].

Для більшості передньопривідних автомобілів такого класу, аеродинамічний баланс має важливе значення через особливості компоновання. Двигун, коробка передач і основні агрегати розташовані в передній частині кузова, тому передня вісь навантажена більше, ніж задня. У звичайних умовах це не є критичним, однак під час руху з високою швидкістю задня частина автомобіля може мати недостатній запас зчеплення з покриттям траси. Через це автомобіль гірше утримує траєкторію в повороті, особливо під час різкої зміни на прямку руху або гальмування перед входом у поворот [2, с. 685, 704-706].

Для збільшення навантаження на задню частину автомобіля застосовують різні аеродинамічні елементи: спойлери, дифузори, торцеві пластини та задні антикрила. Найбільший вплив на вертикальне навантаження задньої осі має саме антикрило, оскільки воно працює як окремий криловий профіль і може створювати значну притискну силу на задній осі.

Серійні або універсальні тюнінгові рішення зазвичай розраховані на встановлення на різні моделі автомобілів, тому не завжди враховують геометрію конкретного кузова та розташування його силових елементів. Часто такі конструкції можуть кріпитись до зовнішніх панелей, зокрема до кришки багажника. Для декоративних або малонавантажених елементів цього достатньо, однак у випадку антикрила, що має створювати значну притискну силу, навантаження доцільно передавати не на тонкі зовнішні панелі, а на більш жорсткі

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

елементи кузова. Це зменшує деформації в зоні кріплення та підвищує надійність конструкції під час руху з високою швидкістю.

У цьому дипломному проєкті розглядається антикрило для автомобіля Mercedes-Benz A200 у кузові W176, підготовленого для участі у змаганнях формату Time Attack. Вихідною геометричною базою для проєктування прийнято повну 3D CAD-модель автомобіля в масштабі 1:1, отриману як готову складальну геометрію кузова, шасі та силових агрегатів, виконану в CATIA та експортовану у нейтральному форматі STEP для подальшої роботи в SolidWorks. Модель відтворює геометрію реального автомобіля-прототипу та містить кузов, шасі, силові агрегати, салон і основні силові елементи автомобіля. Завдяки цьому проєктування антикрила можна виконувати з прив'язкою до фактичної геометрії кузова, компоновання задньої частини автомобіля та можливих зон кріплення. Оскільки автомобіль призначений для участі в українських змаганнях, конструкція антикрила та спосіб його встановлення мають розроблятися з урахуванням технічних вимог регламенту RTR Time Attack [3, 4].

Актуальність теми пов'язана з необхідністю розроблення антикрила для передньопривідного змагального автомобіля, у якого задня частина потребує додаткового навантаження під час руху з високою швидкістю. Готові універсальні рішення не завжди підходять для такої задачі, оскільки не враховують геометрію конкретного кузова, жорсткість місць кріплення та можливість подальшого демонтажу. Використання 3D CAD-моделі автомобіля дає змогу спроектувати профіль, його положення та вузли кріплення з урахуванням реальної форми задньої частини кузова.

Аеродинаміка автомобіля, принцип створення притискної сили та застосування крилових профілів достатньо детально розглянуті у фаховій літературі [1, 2, 5, 6]. Однак у цьому проєкті основна складність полягає не тільки у виборі самого профілю, а й у його прив'язці до конкретного кузова. Антикрило має кріпитись до силових елементів серійного автомобіля через болтові з'єднання, без зварювання та вирізання кузовних деталей. Тому окремого опрацювання

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потребує вузол кріплення, який повинен сприймати аеродинамічне навантаження від профілю і передавати його на кузов автомобіля.

Об'єкт проектування - заднє антикрило автомобіля Mercedes-Benz A200 W176 разом із системою його кріплення до кузова.

Предмет проектування - конструкція, технологія та технологічна оснастка для виготовлення антикрила, яке створює задане аеродинамічне навантаження і кріпиться до силових елементів кузова за болтовою схемою.

Мета дипломного проекту - розробити конструкцію, технологію та оснащення виготовлення антикрила автомобіля, яке створює притискну силу близько 1,8 кН, що відповідає приблизно 180 кгс, на швидкості 60 м/с і може бути встановлене на автомобіль без зварювання до кузова автомобіля та вирізання елементів кузова.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Проаналізувати наявні типи автомобільних антикрил, аеродинамічних профілів і способів їх кріплення до кузова.
2. Обґрунтувати вибір матеріалів несучого профілю, стійок, закладних елементів і кріпильних деталей.
3. Розробити конструкцію антикрила та вузлів його кріплення до автомобіля на основі 3D-моделі кузова.
4. Виконати скінченно-елементне моделювання профілю, стійок і вузлів кріплення під дією розрахункового аеродинамічного навантаження.
5. Розробити технологічний процес виготовлення антикрила та технологічну оснастку для формування композитного профілю.

Під час виконання проекту застосовано метод аналізу літературних та інформаційних джерел, аеродинамічний розрахунок за залежністю для визначення сили, що діє на криловий профіль, тривимірне моделювання у середовищі SolidWorks, числову оцінку аеродинамічних параметрів профілю та скінченно-елементний аналіз несучих елементів конструкції.

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Елемент новизни проекту полягає у розробленні індивідуальної схеми кріплення антикрила до силових елементів кузова Mercedes-Benz A200 W176 без зварювання та вирізання конструктивних елементів автомобіля. Практична значущість роботи полягає в можливості виготовлення та встановлення розробленого антикрила на реальний змагальний автомобіль, а також у використанні запропонованого підходу для проектування подібних аеродинамічних елементів для інших автомобілів цього класу.

1. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ТА ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1. Умови експлуатації автомобіля у змаганнях формату Time Attack

Змагання формату Time Attack належать до дисциплін кільцевих перегонів, у яких основним результатом є найкращий час проходження кола. Для автомобіля в таких умовах критично важливими є стабільність поведінки на високій швидкості, ефективність гальмування, стійкість у поворотах і повторюваність характеристик протягом кількох швидких кіл. Аеродинамічні елементи в таких умовах розглядаються не як декоративні деталі, а як функціональні вузли, що впливають на баланс автомобіля та повинні мати достатню механічну надійність.



Рисунок 1.1. Приклад автомобіля Time Attack із розвиненим аеродинамічним пакетом

					<i>ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ</i>	9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нормативною базою для розгляду умов експлуатації є документи RTR Time Attack 2026 року. Загальний регламент Всеукраїнської серії РТР Тайм Атак 2026 року встановлює, що змагання організуються і проводяться відповідно до нормативної бази FAU, Міжнародного спортивного кодексу FIA та інших регламентуючих документів [3, розд. 1, п. 1.1.1]. Технічні вимоги по класах Національної серії України РТР Тайм Атак 2026 року визначають допущені автомобілі, класи, вимоги до кузова, безпеки та допустимих модифікацій [4].

З огляду на вихідні дані про автомобіль Mercedes-Benz A200 W176 - передній привід, турбований двигун об'ємом 2,0 л, орієнтовну потужність 400-450 к. с., наявність каркаса безпеки та полегшений кузов - у дипломному проекті доцільно орієнтуватися на найжорсткіший релевантний варіант технічних вимог: групу Pro, клас R2. Для цього класу регламент передбачає кузовні автомобілі з моноприводом, побудовані на базі серійного кузова, зі збереженням оригінальних лонжеронів і без обмеження потужності [4, розд. 1, п. 1.2].

Особливе значення для проектування антикрила мають вимоги до збереження несучої структури кузова. У пункті 3.1 "Кузов автомобіля" технічних вимог зазначено, що для групи Pro можливе посилення точок кріплення підвіски та вузлів кузова, однак заборонено полегшувати чи видаляти несучі частини кузова, лонжеронів або рами [4, розд. 3, п. 3.1]. Отже, кріплення антикрила повинно передавати розрахункове навантаження на задні силові зони кузова через власні кронштейни, монтажні пластини й болтові вузли без вирізання або послаблення лонжеронів.

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1. Регламентні положення, що впливають на проект антикрила

Джерело	Положення	Значення для проекту	Конструкторський наслідок
Загальний регламент RTR [3, розд. 1, п. 1.1.1]	Серія проводиться у нормативній системі FAU та FIA.	Визначає загальну спортивну рамку.	Міжнародні документи FIA можуть використовуватися як додатковий технічний орієнтир.
Технічні вимоги RTR [4, розд. 1, п. 1.2]	Клас R2: монопривідний кузовний автомобіль на базі серійного кузова, збереження лонжеронів обов'язкове.	Підходить для W176 FWD 2.0 turbo 400-450 к. с.	Прив'язка проекту до класу Pro R2.
Технічні вимоги RTR [4, розд. 2, п. 2.2]	Для Pro каркас безпеки обов'язковий.	Пояснює рівень підготовки кузова.	Конструкція антикрила розглядається для підготовленого трекового автомобіля.
Технічні вимоги RTR [4, розд. 3, п. 3.1]	Заборонено полегшувати чи видаляти несучі частини кузова / лонжеронів / рами.	Кріплення не повинно послаблювати кузов.	Болтове кріплення через кронштейни до задніх силових зон.
Технічні вимоги RTR [4, розд. 3, п. 3.2]	Для композитних панелей передбачаються механічні з'єднання і монтажні площадки.	Підтверджує доцільність болтової схеми.	Використання опорних пластин, шайб, inserts і hard points.

1.2. Роль заднього антикрила в аеродинамічному балансі автомобіля

Заднє антикрило є аеродинамічним елементом, призначеним для створення притискної сили, яка зростає зі швидкістю руху та збільшує нормальне навантаження на шини без збільшення статичної маси автомобіля. На відміну від баласту, аеродинамічне навантаження виникає саме в режимах високої швидкості, тобто тоді, коли автомобіль найбільше потребує стабільності у поворотах і під час гальмування.

Орієнтовна вертикальна аеродинамічна сила визначається залежністю [1, с. 14; 5, с. 51]:

$$F_z = 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_L \quad (1.1)$$

де ρ - густина повітря, кг/м³;

V - швидкість руху, м/с;

S - площа крила в плані, м²;

C_L - коефіцієнт підйомної сили.

На початковому етапі проектування як цільове значення притискної сили прийнято 1800 Н при швидкості потоку 60 м/с. Це значення використовується як орієнтир для вибору конструктивної схеми антикрила, розташування стійок і попереднього призначення навантажень у міцнісних розрахунках.

Згідно з теорією динаміки гоночного автомобіля, аеродинамічна притискна сила діє через шини та збільшує їх ефективне нормальне навантаження [2, с. 694]. Для передньопривідного хетчбека Mercedes-Benz A200 W176 питання балансу є особливо важливим: передня частина навантажена двигуном і агрегатами трансмісії, а задня вісь на високій швидкості може мати недостатній запас зчеплення. У роботах з аеродинаміки гоночних автомобілів підкреслюється, що оптимальним для треку не завжди є варіант із мінімальним опором; збільшення притискної сили може покращити час кола за рахунок більшої швидкості у поворотах і стабільнішого гальмування [1, 5].

1.3. Аналіз аеродинамічних профілів для автомобільних антикрил

Вибір аеродинамічного профілю для антикрила базується на його здатності створювати необхідну притискну силу за обмежених габаритів конструкції. Для автомобільних антикрил можуть застосовуватися як симетричні, так і несиметричні профілі. Симетричні профілі простіші з точки зору геометрії та виготовлення, однак для отримання значної притискної сили вони, як правило, потребують більших кутів атаки. Це може призводити до зростання аеродинамічного опору та підвищення ризику відриву потоку. Несиметричні високонесучі профілі є

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

доцільнішими для компактних антикрил, де площа в плані та розмах обмежені габаритами кузова автомобіля.

Профіль S1223 розглядається як один із базових кандидатів для подальшого проєктування антикрила. У дослідженнях високонесучих профілів малого числа Рейнольдса він демонструє високий потенціал створення підйімальної сили: для двовимірного профілю S1223 у літературі наведено максимальний коефіцієнт підйімальної сили приблизно $C_{L_{\max}} \approx 2,2$ при $Re \approx 2 \cdot 10^5$ [6]. У роботі Eftekhari, Al-Obaidi та Eftekhari профіль S1223 розглядався разом із профілями NACA0012 і NACA4412 як варіант автомобільного аеродинамічного елемента. Для перевернутого встановлення такий профіль здатний генерувати від'ємну підймальну силу, тобто притискну силу, що є основною вимогою для заднього антикрила автомобіля [7].

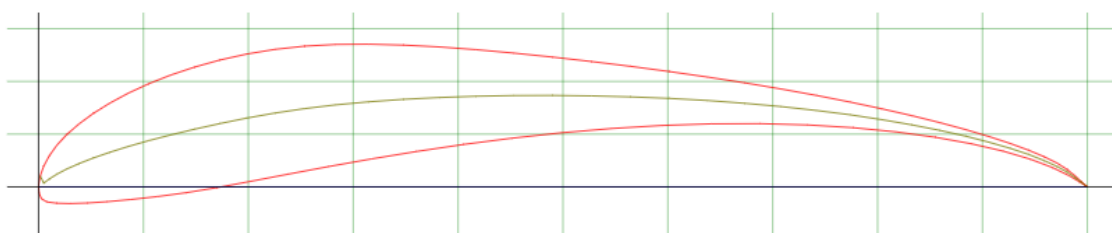


Рисунок 1.2. Геометричний контур аеродинамічного профілю Selig S1223

Водночас наведені літературні характеристики не можна безпосередньо переносити на готову конструкцію антикрила. Значення $C_{L_{\max}} \approx 2,2$ отримане для двовимірного профілю за умов, які відрізняються від реальної роботи автомобільного антикрила. У готовій конструкції профіль має скінченний розмах, торцеві пластини, елементи кріплення, а також працює поблизу кузова автомобіля у збуреному потоці. Через це фактичні значення притискної сили та аеродинамічного опору можуть відрізнятися від даних, отриманих для ізольованого двовимірного профілю.

З огляду на це у межах цієї роботи профіль S1223 приймається не як остаточно підтверджене рішення, а як перспективний високонесучий профіль для

подальшої CFD-перевірки в SolidWorks Flow Simulation та конструктивного опрацювання. Остаточна оцінка його придатності виконується з урахуванням реальної геометрії антикрила, положення відносно кузова, кута встановлення та впливу торцевих пластин.

Для крил малого видовження важливим є вплив кінцевих вихорів і скосу потоку. У роботах, присвячених проектуванню низькоаспектних крил з торцевими пластинами, показано, що ендплейти можуть підвищувати ефективне видовження крила та зменшувати втрати на його кінцях [8, с. 39; 9, с. 11-12]. Тому для подальшого проектування приймається високонесучий профіль S1223 у поєднанні з торцевими пластинами, які мають зменшити перетікання потоку через кінці крила та підвищити ефективність роботи антикрила.

1.4. Аналіз конструкцій задніх антикрил для автомобілів подібного класу

Готові рішення у вигляді накладних спойлерів на дах для Mercedes-Benz W176 [10] мають переважно декоративну або малонавантажену функцію. Їх перевагою є простий монтаж і відповідність формі кузова, однак такі елементи не мають повноцінної силової схеми для передавання значної притискної сили на кузов. Тому для дипломного проекту вони можуть використовуватися лише як зовнішній стилістичний аналог, а не як силовий прототип.



Рисунок 1.3. Приклад спойлеру на дах на Mercedes Benz A-Class W176

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			14

Більш подібним аналогом до нашого авто є Volkswagen Golf GTI TCR - передньопривідний трековий хетчбек із регульованим заднім антикрилом [11, п. 4.12; 12]. Для цього проекту він важливий як приклад логіки компоновання: окремий криловий профіль, торцеві пластини, регулювання кута атаки та жорстке кріплення стійок до внутрішньої частини багажника.

Сучасні комерційні рішення також часто використовують верхнє кріплення типу swan-neck [13; 14, абз. 6]. Перевагою такої схеми є зменшення впливу стійок на нижню робочу поверхню профілю, яка є критичною для створення притисної сили. Недоліком є складніша геометрія стійок та вищі вимоги до їх жорсткості. Для проекту приймається саме верхня схема кріплення, оскільки вона відповідає сучасній практиці трекових антикрил.



Рисунок 1.4. Заднє антикрило Volkswagen Golf GTI TCR

Таблиця 1.2. Порівняння конструктивних аналогів

Аналог	Недоліки	Переваги	Що використовується у проекті
Roof spoiler для Mercedes-Benz W176 [10]	Переважно декоративна або малонавантажена функція; немає силового шляху для 1800 Н.	Простий монтаж, відповідність геометрії кузова.	Лише зовнішнє компоновання та прив'язка до кузова W176.

Продовження таблиці 1.2.

Volkswagen Golf GTI TCR [11, 12]	Заводський гоночний кузов; рішення не переноситься безпосередньо на W176.	Передньопривідний трековий хетчбек із регульованим антикрилом.	Окремий профіль, ендплейти, регулювання кута атаки.
Swan-neck комерційні рішення [13, 14]	Складні стійки, вищі вимоги до жорсткості та точності обробки.	Чистіша нижня поверхня профілю, сучасна силова схема.	Верхнє кріплення типу swan-neck і фрезеровані металеві стійки.

1.5. Аналіз способів кріплення антикрила до кузова

При розрахунковому навантаженні 1800 Н кріплення антикрила до тонких зовнішніх декоративних панелей є технічно необґрунтованим, оскільки такі панелі можуть деформуватися та змінювати положення профілю. Навантаження має передаватися через проміжні кронштейни до внутрішніх жорстких елементів кузова. Для автомобіля класу Pro R2 це особливо важливо, оскільки регламент вимагає збереження оригінальних лонжеронів [4].

Традиційні нижні стійки простіші у виготовленні, але можуть порушувати обтікання нижньої робочої поверхні профілю. Верхнє кріплення типу swan-neck виводить стійки з критичної зони під крилом і може зменшити аеродинамічні втрати [15, с. 9]. Водночас така схема створює значні згинальні моменти у стійках, тому потребує достатньої жорсткості, розрахунку напружень і перевірки переміщень.



Рисунок 1.5. Приклад верхнього кріплення антикрила типу swan-neck

У місцях кріплення композитного профілю до металевих стійок навантаження не можна передавати безпосередньо через м'яке осердя. У такому випадку болти можуть продавлювати осердя, а навколо отворів можуть з'являтися локальні пошкодження обшивок і розшарування матеріалу. Тому в зонах кріплення потрібно передбачати локальні підсилення: жорсткі закладні ділянки, заливні вставки або металеві втулки, через які навантаження передається на міцнішу частину конструкції [16-18].

1.6. Огляд матеріалів і технологій виготовлення антикрил

Для основного профілю антикрила технічно обґрунтованою є сендвіч-конструкція: зовнішні обшивки з вуглепластику та легке полімерне осердя. Така схема забезпечує високу питому згинальну жорсткість при малій масі [19, 20]. Металеві елементи доцільно використовувати для стійок і кронштейнів, де потрібна ізотропність, передбачувана робота у болтових з'єднаннях і можливість точного фрезерування.

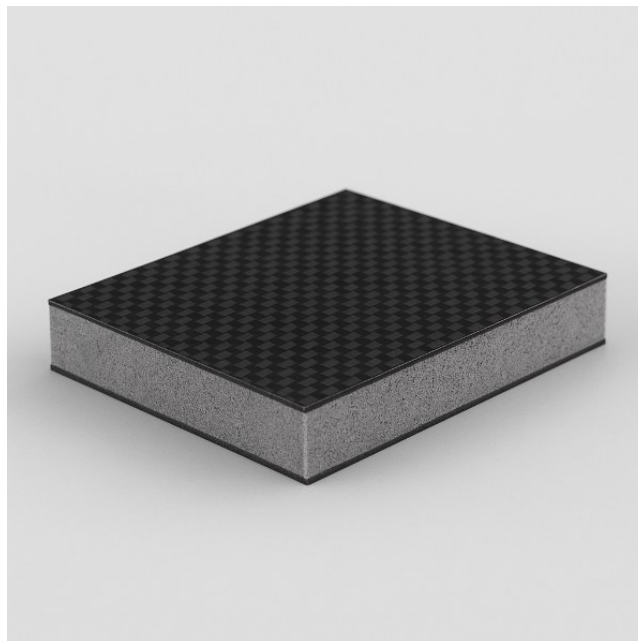


Рисунок 1.6. Схема сендвіч-конструкції з вуглепластиковими обшивками та легким полімерним осердям

Практичні технологічні посібники з виготовлення карбонових крил і вакуумної інфузії [21, 22], а також власна опублікована робота з малосерійного виготовлення автомобільних композитних деталей [23] підтверджують технологічну доступність позаавтоклавних процесів для одиничного або малосерійного виробництва. Водночас конкретна марка вуглецевої тканини, тип смоли, кількість шарів та схема укладання остаточно уточнюються у технологічному розділі.

1.7. Патентно-інформаційний пошук аналогів

Патентно-інформаційний пошук дозволяє оцінити технічні принципи, що застосовуються у конструкціях задніх антикрил: жорстке передавання навантаження, регулювання положення профілю, застосування допоміжних елементів задньої кромки та адаптивних механізмів. Ранній патент US3455594A демонструє ідею прямого передавання аеродинамічного навантаження на несучі вузли автомобіля [24].

Патент WO1997032770A1 описує задній автомобільний спойлер із можливістю зміни положення [25]. Патент US8960770B2 / EP2631160B1 розглядає задній спойлер із регульованими аеродинамічними профілями [26]. Патент WO2017123640A2 описує складніше адаптивне крило з рухомою секцією та висувним елементом [27]. Для цього дипломного проекту надмірно складні активні рішення не приймаються; обирається статична регульована конструкція з ручною зміною кута встановлення.

Таблиця 1.3. Патентно-інформаційний пошук аналогів

Патент	Недоліки	Переваги	Що використовується у проекті
US3455594A [24]	Нестандартний шлях навантаження через вузли коліс, не підходить безпосередньо для W176.	Ідея жорсткого передавання притискної сили.	Принцип контрольованого силового шляху до несучих елементів.
WO1997032770A1 [25]	Складність механізму зміни положення.	Можливість зміни аеродинамічних характеристик.	Ручне регулювання кута встановлення.
US8960770B2 / EP2631160B1 [26]	Складніше за статичну конструкцію.	Поєднання опорних елементів і регульованих профілів.	Ідея регульованого профілю без активної механіки.
WO2017123640A2 [27]	Адаптивний механізм складний і важкий.	Висока функціональність і можливість зміни аеродинаміки.	Не приймається; використовується лише принцип регулювання.

1.8. Висновки до першого розділу

- Конструкція антикрила реалізується як окремий криловий профіль із торцевими пластинами та можливістю регулювання кута встановлення.
- Для нормативного обґрунтування проект прив'язується до найжорсткішого релевантного варіанта RTR - групи Pro, класу R2, що вимагає збереження оригінальних лонжеронів.
- Профіль S1223 приймається як перспективний кандидат для подальшого CFD-аналізу; його двовимірні характеристики не переносяться безпосередньо на реальне тривимірне крило.
- Для кріплення приймається схема верхнього кріплення типу swan-neck, яка зменшує вплив стійок на нижню робочу поверхню профілю.
- Навантаження від антикрила повинно передаватися на задні силові зони кузова через болтові кронштейни без послаблення несучих частин кузова.
- Композитний профіль повинен мати локальні hard points або inserts у зонах болтового з'єднання зі стійками.

2. ВИБІР МАТЕРІАЛІВ АНТИКРИЛА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ

2.1. Основні вимоги та критерії до вибору матеріалів

Антикрило працює в умовах аеродинамічного тиску, вібрацій, циклічних навантажень і можливих локальних ударних пошкоджень. Конструкцію доцільно розділити за функціональним призначенням: композитні матеріали використовуються для легкого та жорсткого профілю, а металеві сплави - для надійного передавання концентрованих зусиль у стійках, кронштейнах і болтових вузлах.

Для основного профілю ключовими є мала маса, висока питома згинальна жорсткість, можливість формування точної аеродинамічної поверхні та технологічність одиничного виготовлення. Конкретна марка вуглецевої тканини, смоли, кількість шарів і схема армування не фіксуються у цьому розділі остаточно, оскільки вони мають бути обрані в технологічному розділі після уточнення способу формування, доступності матеріалів і розрахункової товщини обшивок.

Оскільки конструкція поєднує CFRP, алюмінієві сплави та сталь, окремим критерієм є електрохімічна сумісність. Прямий контакт вуглепластику з алюмінієм за наявності вологи може утворювати гальванічну пару, тому конструкція повинна містити ізоляційні шари, покриття, герметики або втулки [28-30].

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Таблиця 2.1. Фізико-механічні характеристики основних розглядаємих матеріалів

Матеріал	Густина ρ	Модуль пружності / зсуву	Міцність	Особливості застосування	Джерело
CFRP-ламінат	залежить від системи	залежить від схеми укладання	залежить від тканини, смоли та об'ємної частки волокна	Доцільний для обшивок основного профілю завдяки високій питомій жорсткості та малій масі. Конкретна тканина, смола, кількість шарів і схема армування уточнюються у технологічному розділі.	[19-22]
AIREX C70.75	80 кг/м ³	$E_{\text{стиск}} = 104$ МПа; $G_{\text{зсув}} = 26$ МПа	$\sigma_{\text{стиск}} = 1,45$ МПа $\tau_{\text{зсув}} = 1,2$ МПа	Конструкційне полімерне осердя для сендвіч-панелей, сумісне з вакуумною інфузією, RTM та препреговими технологіями.	[31]
Divinycell H80	80 кг/м ³	$E_{\text{стиск}} = 85$ МПа; $G_{\text{зсув}} = 31$ МПа	$\sigma_{\text{стиск}} = 1,2$ МПа $\tau_{\text{зсув}} = 1$ МПа	PVC-осердя для сендвіч-конструкцій; може застосовуватися для легких композитних панелей.	[32]
OHACELL 51 IG-F	52±12 кг/м ³	$E_{\text{стиск}} = 43$ МПа; $G_{\text{зсув}} = 19$ МПа	$\sigma_{\text{стиск}} = 0,9$ МПа $\tau_{\text{зсув}} = 0,8$ МПа	РМІ-осердя з малою густиною; придатне для композитних конструкцій, де важлива мінімізація маси.	[33]
Lantor Soric XF	близько 600 кг/м ³ у просоченому стані	$G_{\text{зсув}} = 35$ МПа; $E_{\text{згин}} = 800$ МПа	$\sigma_{\text{стиск}} = 8$ МПа $\tau_{\text{зсув}} = 3,5$ МПа	Матеріал для тонких композитних панелей і локального формування товщини; не розглядається як основне товсте осердя профілю.	[34]

Продовження таблиці 2.1.

EN AW-6082-T6	$\approx 2,70$ г/см ³	$E \approx 70$ ГПа	$R_m = 290-310$ МПа; $R_{p0,2} = 250-260$ МПа	Алюмінієвий сплав середньої міцності з доброю технологічністю та корозійною стійкістю; може застосовуватися для фрезерованих або зварних елементів за умови врахування технологічних обмежень.	[35]
EN AW-7075-T6/T651	$\approx 2,81-2,85$ г/см ³	$E \approx 71,7$ ГПа	$R_m = 530-560$ МПа; $R_{p0,2} = 460-505$ МПа	Високоміцний алюмінієвий сплав для фрезерованих силових деталей без зварювання; потребує захисту від корозії та корозійного розтріскування під напруженням.	[35], [36]
EN AW-6005A-T6	$\approx 2,70$ г/см ³	$E \approx 69-70$ ГПа	$R_m \approx 270$ МПа; $R_{p0,2} \approx 225$ МПа	Екструдований алюмінієвий сплав, придатний для профільних і зварних елементів; може розглядатися для балкових деталей конструкції.	[35]
Пултродована CFRP-труба	$\approx 1,55-1,60$ г/см ³	$E \approx 120-140$ ГПа вздовж волокон	висока міцність у поздовжньому напрямі	Доцільна для елементів, що працюють переважно на розтяг або стиск уздовж осі; потребує металевих наконечників або закладних у зонах кріплення.	[19-22]
Болти класу 8.8 / 10.9	$\approx 7,85$ г/см ³	$E \approx 210$ ГПа	$R_m = 800 / 1040$ МПа; $R_{p0,2} = 640 / 940$ МПа	Стандартизоване метричне кріплення для розбірних з'єднань; діаметр, клас міцності та кількість болтів уточнюються розрахунком.	[37]

2.2. Індеси Ешбі як попередній матеріалознавчий критерій

Для елементів, що працюють переважно на згин, попередній відбір матеріалу може виконуватися за підходом матеріальних індесів Ешбі [38]. Мінімізація маси за заданої жорсткості пов'язана з індексом $\frac{\sqrt{E}}{\rho}$, а мінімізація маси за заданої міцності - з індексом $\frac{\sqrt{\sigma}}{\rho}$. Для металів у цій роботі як σ прийнято умовну межу текучості $R_{p0,2}$. Для CFRP індеси не можемо навести як остаточні, оскільки

властивості ламінату залежать від фактичного методу викладки, частки волокна та технології виготовлення.

Для попереднього порівняння використано такі матеріальні індекси:

$$M_E = \frac{\sqrt{E}}{\rho} \quad (2.1)$$

$$M_\sigma = \frac{\sqrt{R_{p0,2}}}{\rho} \quad (2.2)$$

Таблиця 2.2. Порівняння металевих матеріалів за індексами Ешбі

Матеріал	$\frac{\sqrt{E}}{\rho}$	$\frac{\sqrt{R_{p0,2}}}{\rho}$	Примітка
Сталь S355	1,85	2,40	База для порівняння; висока жорсткість, але велика густина.
EN AW-6082-T6	3,09	≈5,95	Основний матеріал стійок за балансом маси, технологічності та корозійної стійкості.
EN AW-7075-T6/T6511	≈2,98	≈7,5-7,9	Вища питома міцність, але ризики SCC і гірша корозійна стійкість.
EN AW-6005A-T6	≈2,98	≈2,98	Екструдований алюмінієвий сплав для профільних і зварних балкових елементів; за питомою жорсткістю близький до EN AW-6082-T6, але має нижчу питому міцність.

За індексом питомої згинальної жорсткості алюмінієві сплави приблизно у 1,6-1,7 раза переважають сталь. Тому для виносних стійок сталь не вигідна за масою, хоча може залишатися варіантом для внутрішньокузовних опорних деталей з обмеженим простором. Al 6082-T6 попередньо приймається як основний матеріал стійок завдяки поєднанню питомої жорсткості, технологічності та корозійної

стійкості. Al 7075-T6/T6511 має вищий індекс питомої міцності, але використовується лише як альтернатива для локально навантажених фрезерованих деталей.

2.3. Перевірка матеріалів за регламентами FIA Appendix J Article 252

Оскільки автомобіль проєктується для участі в українських змаганнях RTR Time Attack, під час вибору матеріалів додатково враховано положення FIA Appendix J Article 252. Це пов'язано з тим, що регламент RTR спирається на нормативну базу FAU та FIA, тому вимоги FIA можна використовувати як додатковий орієнтир для оцінки допустимості матеріалів у конструкції.

У цьому документі встановлено загальні обмеження щодо застосування матеріалів із підвищеними питомими характеристиками, зокрема для матеріалів із питомим модулем понад 40 ГПа/(г/см), а для металевих матеріалів окремо регламентуються питомі показники границі текучості та тимчасового опору розриву [39, п. 1.3].

Для розглянутих металевих матеріалів - сталі S355, EN AW-6082-T6, EN AW-6005A-T6 та EN AW-7075-T6/T651 - питомі значення модуля пружності не перевищують зазначене обмеження.

2.4. Вибір матеріалу наповнювача основного профілю антикрила

Обшивки CFRP-сендвіча сприймають розтяг і стиск від згинальних моментів, а осердя розносить обшивки між собою, підвищує згинальну жорсткість профілю, стабілізує їх від локальної втрати стійкості та сприймає дотичні напруження. Тому матеріал осердя має забезпечувати малу масу, достатню міцність на стиск і зсув, а також сумісність із вибраною технологією виготовлення.

Для основного профілю антикрила розглянуто конструкційні полімерні піни AIREX C70.75, Divinycell H80 і ROHACELL 51 IG-F, а також інфузійний матеріал Lantor Soric XF. AIREX C70.75 і Divinycell H80 мають густину близько 80 кг/м і є доцільними варіантами для сендвіч-конструкцій, що виготовляються методом

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

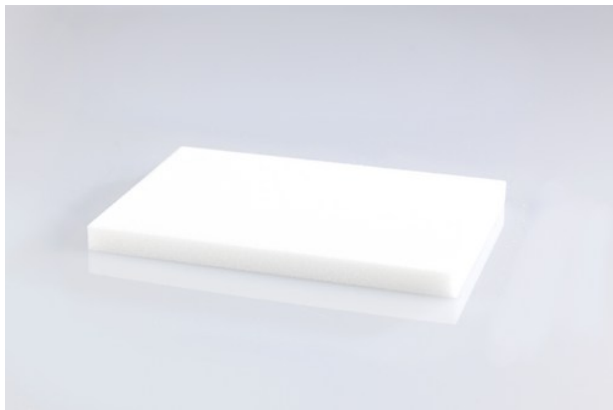
вакуумної інфузії або RTM [31], [32]. ROHACELL 51 IG-F має меншу густину і може розглядатися як легша, але дорожча альтернатива [33].



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.7. Розглянуті матеріали осердя сендвіч-конструкції: а) AIREX C70.75; б) Divinycell H80; в) ROHACELL 51 IG-F; г) Lantor Soric XF

Lantor Soric XF доцільно застосовувати для тонких панелей, ендплейтів або локального формування товщини, оскільки він добре працює в інфузійних процесах, але у просоченому стані має значно більшу густину [34]. XPS може використовуватися як доступний технологічний матеріал для формування геометрії профілю, однак через відсутність підтверджених характеристик конкретної марки не приймається як основне розрахункове осердя.

Отже, для основного профілю антикрила найбільш доцільними є Divinycell H80 або AIREX C70.75. ROHACELL 51 IG-F може застосовуватися як полегшена альтернатива, а Lantor Soric XF - для тонких або локальних сендвіч-елементів.

2.5. Локальні підсилення, вузли кріплення та закладні

Зони з'єднання антикрила зі стійками є критичними для CFRP-сендвіч-конструкції, оскільки саме через них передаються зосереджені навантаження від притискної сили та моментів. Пряме затягування болтів через м'яке осердя може призвести до його зминання, локального розшарування обшивок або виривання кріплення. Тому в місцях встановлення болтів необхідно передбачати локальні підсилення, які замінюють слабе осердя та забезпечують передавання навантаження на обшивки й силові елементи конструкції [16-18].

Для таких зон можуть застосовуватися монолітні ділянки з ПКМ, заливні втулки, металеві втулки або закладні елементи. Монолітне підсилення добре інтегрується у композит під час викладки, однак потребує збільшення кількості локальних шарів. Заливні втулки та металеві закладні краще розподіляють навантаження від болта й захищають осердя від зминання, але ускладнюють технологію виготовлення. У разі застосування металевих елементів необхідно передбачати ізоляцію від CFRP для зменшення ризику гальванічної корозії.

У межах цієї роботи для найбільш навантажених вузлів кріплення доцільно застосовувати металеві втулки або закладні елементи в поєднанні з локальним підсиленням композитними шарами. Широкі притискні шайби або пластини можуть використовуватися як допоміжний елемент, однак вони не замінюють жорсткі точки у сендвіч-конструкції.

2.6. Вибір матеріалу ендплейтів

Ендплейти повинні мати достатню площинну жорсткість, стійкість до вібрацій і ударних впливів від зовнішнього середовища. З точки зору маси доцільними є тонкі CFRP-пластини або тонкі сендвіч-панелі. Для таких деталей

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

може застосовуватися Lantor Soric XF, оскільки він технологічно зручний для вакуумної інфузії, добре працює на криволінійних формах і має малу товщину. Для простішого виконання допускається алюмінієвий лист EN AW-6082-T6, однак його маса буде більшою.

2.7. Вибір матеріалу несучих елементів

Металеві елементи системи кріплення повинні сприймати зосереджені навантаження від антикрила та передавати їх на силові зони кузова. На етапі вибору матеріалів точна форма окремих деталей ще не є остаточною, тому матеріал доцільно приймати не для кожної деталі окремо, а для всієї групи несучих елементів: стійок, кронштейнів, поперечин, фіксуючих пластин і з'єднувальних вузлів.

Для цієї групи попередньо приймається алюмінієвий сплав EN AW-6082-T6. Він має достатню міцність для навантажених алюмінієвих деталей, невелику густину, добру корозійну стійкість і добре піддається механічній обробці. Завдяки цьому його можна використовувати для фрезерованих, профільних і частини зварних елементів конструкції. Якщо деталь входить до зварного вузла, під час подальшого розрахунку потрібно враховувати зниження міцності матеріалу в зоні термічного впливу.

Для окремих фрезерованих деталей, які працюють у найбільш навантажених вузлах і не потребують зварювання, може розглядатися EN AW-7075-T651. Його перевагою є значно вища границя текучості та міцність порівняно з EN AW-6082-T6. Водночас цей сплав має гіршу корозійну стійкість, потребує захисного покриття і не є доцільним для зварних балок або інших зварних вузлів [36]. Тому його застосування варто обмежувати тільки окремими фрезерованими деталями після уточнення конструкції та результатів міцнісної перевірки.

Конструкційна сталь також могла б забезпечити високу міцність і жорсткість, але її використання збільшило б масу навісної системи кріплення та потребувало б додаткового антикорозійного захисту. CFRP-стійки мають добрі питомі

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

характеристики, однак для них складніше виконати надійні болтові з'єднання, а в місцях кріплення зростає ризик локального розшарування. Тому для цього проекту металеві алюмінієві елементи є більш простим і технологічно зрозумілим рішенням.

Остаточне призначення EN AW-6082-T6 або EN AW-7075-T651 для конкретних деталей виконується в конструкторському та розрахунковому розділах після уточнення геометрії, способу виготовлення та характеру навантаження кожного вузла.

2.8. Вибір кріпильних елементів

Болтові з'єднання антикрила працюють на розтяг, зсув, зминання і можуть зазнавати циклічних навантажень. У проекті доцільно використовувати метричні болти класів міцності 8.8 або 10.9 за ISO 898-1 [37, с. 82]. Не доцільно задавати діаметр кріпильних елементів емпірично; остаточний діаметр, кількість болтів і момент затягування визначаються у розрахунковому розділі.

Для розподілу питомого тиску від головок болтів і гайок на композитні або тонколистові деталі необхідні збільшені шайби, притискні пластини або спеціальні втулки. У вузлах CFRP-сендвіча болт повинен спиратися не на м'яке осердя, а на hard point, potted insert або металеву втулку.

2.9. Захист від гальванічної корозії

З'єднання CFRP з алюмінієм і сталлю потребує окремого конструктивного захисту. У контакті з алюмінієм у присутності електроліту CFRP може працювати як катод, а алюміній - як анод, що прискорює корозію металу [28-30].

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

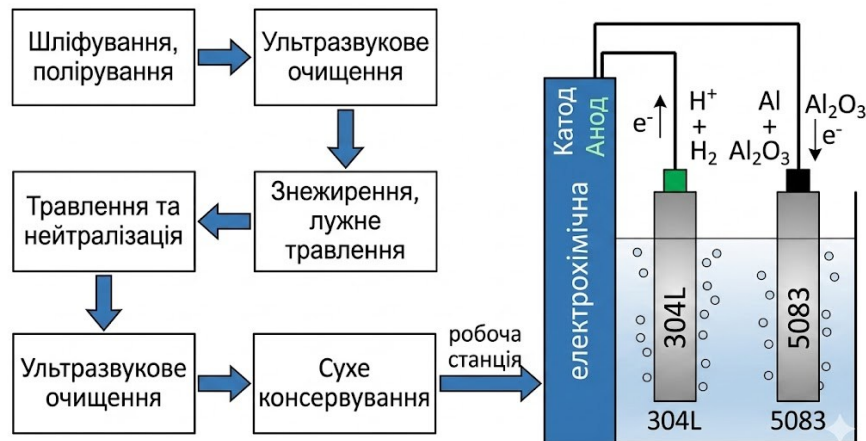


Рисунок 1.8. Схема процесу анодування алюмінієвого сплаву [29]

Для запобігання деградації металевих деталей необхідно виключити прямий електричний контакт між CFRP і алюмінієм. Для цього можуть застосовуватися шар склотканини як діелектричний бар'єр, полімерні прокладки, анодування алюмінієвих стійок, захисні покриття, герметизація контактних поверхонь, ізолюючі втулки та шайби. Отвори в композиті мають бути герметизовані, щоб запобігти потраплянню вологи в осердя та зону контакту з металом.

2.10. Відповідність матеріалів нормативним документам та аналоги

Під час вибору матеріалів для конструкції антикрила важливо не лише вказати їхні позначення, а й визначити, з яких джерел приймаються розрахункові характеристики. Для стандартних металевих матеріалів можна використовувати прив'язку до ГОСТ, ДСТУ, EN або ISO. Однак не всі матеріали, що застосовуються в цій роботі, мають повні аналоги в системі ГОСТ або ДСТУ. Особливо це стосується композитів, конструкційних піन та спеціалізованих інфузійних матеріалів. Тому для таких матеріалів основними джерелами властивостей є стандарти EN/ISO та технічні листи виробників.

Алюмінієвий сплав EN AW-6082-T6 можна орієнтовно зіставити зі сплавами типу АД35 за ГОСТ 4784-2019, проте повним аналогом він не є. Відмінності пов'язані з хімічним складом, режимами термооброблення, сортаментом

напівфабрикатів і нормованими механічними властивостями. У подальших розрахунках характеристики EN AW-6082-T6 приймаються за EN 755-2 [35].

Сплав EN AW-7075-T6/T6511 за призначенням і рівнем міцності можна порівнювати зі сплавами типу B95, але така відповідність також є лише орієнтовною. Для нього приймаються характеристики за EN 755-2, а при виборі необхідно враховувати нижчу корозійну стійкість, ризик корозійного розтріскування під напруженням і недоцільність застосування у зварних вузлах [35], [36].

Для болтових з'єднань класів міцності 8.8 і 10.9 як основне джерело використовується ISO 898-1. Цей стандарт задає механічні властивості болтів, гвинтів і шпильок із вуглецевих та легованих сталей [37].

Для CFRP, AIREX C70, Divinycell H80, ROHACELL 51 IG-F і Lantor Soric XF властивості не можна коректно приймати за умовними аналогами ГОСТ або ДСТУ. Їхні характеристики залежать від конкретної марки матеріалу, схеми армування, типу смоли, об'ємної частки волокна та технології виготовлення. Тому для цих матеріалів використовуються технічні листи виробників і довідкові дані з джерел [31-34].

FIA Appendix J Article 252 у роботі використовується як додатковий орієнтир для перевірки допустимості матеріалів у спортивних автомобільних конструкціях [39, п. 1.3]. Основним документом для оцінки відповідності залишається регламент конкретного змагання, тому для даного проєкту першочергове значення мають вимоги RTR, а положення FIA застосовуються як допоміжна перевірка.

2.11. Висновки до другого розділу

Для основного профілю антикрила попередньо прийнято сендвіч-конструкцію з CFRP-обшивками. Конкретний тип тканини, смоли, кількість шарів та схема укладання визначаються в технологічному розділі, оскільки ці параметри безпосередньо пов'язані з обраним способом виготовлення.

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як осердя для професійного виконання профілю доцільно використовувати конструкційні піни AIREX C70 або Divinycell H80. Обидва матеріали мають малу густину, достатні характеристики стиску та зсуву і підходять для виготовлення сендвіч-конструкцій. ROHACELL 51 IG-F можна розглядати як легшу, але дорожчу альтернативу для випадків, коли зменшення маси має вищий пріоритет.

Lantor Soric XF краще застосовувати не для всього об'єму основного профілю, а для тонких сендвіч-панелей, ендплейтів або локальних елементів. Його перевагою є добра робота в інфузійних процесах, але у просоченому стані він має значно більшу густину, що небажано для великого профілю антикрила.

XPS також може використовуватися як доступний варіант осердя для формування геометрії профілю антикрила, особливо якщо йдеться про дослідний або навчальний зразок. Матеріал легко обробляється на CNC-верстаті або методом гарячого дроту, тому дає змогу відносно швидко отримати потрібну форму без складного оснащення.

У місцях кріплення профілю до стійок м'яке осердя не повинно сприймати навантаження безпосередньо від болтів. У таких зонах його потрібно замінювати жорсткими локальними підсиленнями. Це можуть бути монолітні ділянки з CFRP, заливні вставки або металеві втулки. Завдяки цьому навантаження від кріплення передається не на слабе осердя, а на підсилену зону конструкції, що зменшує ризик зминання, розшарування обшивок і виривання болтового з'єднання.

Для виносних стійок типу swan-neck і більшості кронштейнів попередньо основним матеріалом обрано EN AW-6082-T6. Він забезпечує прийнятне поєднання міцності, малої маси, технологічності обробки та корозійної стійкості. EN AW-7075-T6/T6511 залишено як варіант для окремих високонавантажених фрезерованих деталей, які не підлягають зварюванню і можуть бути захищені від корозії.

Болтові з'єднання виконуються на основі метричних болтів класів міцності 8.8 або 10.9. Конкретний діаметр, кількість болтів і момент затягування визначаються в розрахунковій частині після уточнення навантажень у вузлах.

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У місцях контакту CFRP з алюмінієм або сталлю необхідно передбачити захист від гальванічної корозії. Для цього можуть використовуватися анодування, герметик, діелектричні прокладки, ізолюючі втулки або проміжний шар склотканини.

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

3. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ АНТИКРИЛА ТА ЙОГО КРІПЛЕННЯ ДО АВТОМОБІЛЯ

У цьому розділі розглядається конструкція антикрила автомобіля Mercedes-Benz A200 W176: загальне компонування збірки, основні вузли кріплення та підготовка моделі до подальшої розрахункової перевірки.

Антикрило розглядається як навантажена силова система. Притискна сила виникає на CFRP-профілі та через вузли кріплення, стійки типу swan-neck, кронштейни й опорні поперечини передається до задньої частини кузова. Тому в розділі описується не лише форма профілю та ендплейтів, а й шлях передавання навантаження до кузовних точок кріплення.

Повна скінченно-елементна перевірка збірки виконується в наступному розділі. Тут розглядаються конструктивні рішення, необхідні для уточнення геометрії та підготовки моделі до FEA.

3.1. Вихідні дані для проєктування

Перед вибором остаточних габаритів антикрила необхідно оцінити, який коефіцієнт притискної сили повинен забезпечити профіль при заданій швидкості. Для цього попередньо приймається одноелементне крило з профілем S1223, розмахом $B = 1,7$ м і хордою $c = 0,4$ м. Такі розміри обрані з урахуванням ширини задньої частини кузова, компонування кріплень, а також досвіду застосування задніх антикрил на автомобілях класу TCR, де крило має залишатися компактным і не виходити за розумні габарити кузова [11], [12].

Профіль S1223 обрано як високонесучий профіль, для якого в літературі наведено максимальне значення коефіцієнта підіймальної сили двовимірного профілю $C_{L_{\max}} \approx 2,2$ [6]. У реальній конструкції це значення не можна напругу переносити на готове антикрило, оскільки крило має скінченний розмах, торцеві пластини, стійки, а також працює у збуреному потоці за кузовом автомобіля. Тому

для попереднього проектування важливо не досягати граничного $C_{L\max}$ та отримати робоче значення коефіцієнта притискної сили з певним запасом до зриву потоку.

За прийнятих габаритів, площа крила в плані становить:

$$S = B \cdot c = 1,7 \cdot 0,4 = 0,68 \text{ м}^2 \quad (3.1)$$

де B - розмах профілю, м;

c - хорда профілю, м.

Динамічний тиск потоку при швидкості $V = 60$ м/с, визначається за залежністю:

$$S = \frac{1}{2} \rho V^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 60^2 = 2205 \text{ Па} \quad (3.2)$$

де ρ - густина повітря, кг/м³;

V - швидкість, м/с.

Тоді добуток динамічного тиску на площу крила дорівнює:

$$q \cdot S = 2205 \cdot 0,68 = 1499 \text{ Н} \quad (3.3)$$

де q - динамічний тиск потоку, Па;

S - площа крила, м².

Тоді, для отримання притискної сили $D_f = 1800$ Н, потрібний коефіцієнт притискної сили становить:

$$C_L = \frac{D_f}{qS} = \frac{1800}{1499} = 1,2 \quad (3.4)$$

Розрахункове значення $C_L = 1,2$ не є завищеним для профілю S1223, оскільки його літературне значення для двовимірного випадку суттєво більше. У реальній конструкції ефективність буде нижчою через скінченний розмах, торцеві вихори, вплив ендплейтів, стійок і потоку за кузовом. Проте прийнята площа профілю 0,68 м² дозволяє отримати необхідну притискну силу без переходу до надмірних кутів

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

встановлення. Тому приймаємо ширину $B = 1700$ мм та хорду $c = 400$ мм для одноелементного антикрила цієї конструкції. Остаточні значення притискної сили та аеродинамічного опору визначимо в наступному розділі.

Розрахункова швидкість для подальшого аеродинамічного та міцнісного аналізу приймається 60 м/с. Номінальна притискна сила антикрила приймається на рівні 1800 Н. У цьому розділі це значення використовується як вихідне конструктивне навантаження.

Під час компоновання стійок спочатку було прийнято симетричну схему: розмах профілю умовно поділено на чотири рівні частини. За такого підходу кожна стійка мала б розташовуватися на відстані, від осі профілю:

$$\frac{B}{4} = \frac{1700}{4} = 425 \text{ мм} \quad (3.5)$$

Після прив'язки конструкції до геометрії заднього скла і кузова положення стійок було трохи зміщено ближче до центра. Це потрібно для того, щоб залишити запас під форму самих стійок і не ускладнювати вузли кріплення. У підсумку відстань від осі симетрії до внутрішньої базової площини стійки прийнято 405 мм.

Тоді відстань між стійками до врахування їх товщини становить:

$$b_0 = 2 \cdot 405 = 810 \text{ мм}$$

Товщина стійки в зоні кріплення попередньо прийнята 6 мм. Це значення обрано з урахуванням конструкцій аналогічних swap-neck-кріплень, властивостей алюмінієвого сплаву EN AW-6082-T6, а також технологічних вимог до фрезерування деталі. Менша товщина ускладнила б виконання болтових отворів, зменшила б жорсткість стійки в зоні кріплення та підвищила б ризик локальних деформацій. Більша товщина збільшувала б масу без очевидної потреби на етапі попереднього компоновання. Тому товщина 6 мм прийнята як базове конструктивне значення, яке надалі перевіряється за результатами скінченно-елементного аналізу.

Оскільки стійки мають товщину 6 мм і зміщуються всередину з обох боків, фактична відстань між їх внутрішніми площинами становить:

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$b = b_0 - 2 \cdot 6 = 810 - 12 = 798 \text{ мм}$$

За такої схеми, виліт профілю від внутрішньої площини стійки до бокового краю антикрила дорівнює:

$$l = \frac{B - b}{2} = \frac{1700 - 798}{2} = 451 \text{ мм} \quad (3.8)$$

де B - розмах профілю антикрила, мм;

b - відстань між внутрішніми площинами основних стійок, мм.

Виліт профілю від стійки до бокового краю становить 451 мм. Це значення враховується під час подальшої перевірки профілю, торцевих пластин і вузлів кріплення, оскільки крайові ділянки антикрила працюють як консольні частини поза площиною основних стійок. Симетричне розташування також спрощує побудову CAD-моделі: спочатку формується одна половина конструкції, після чого вона дзеркально відображається відносно центральної площини автомобіля.

Положення антикрила відносно кузова приймалося з орієнтацією на обмеження, характерні для автомобілів класу TCR. Заднє крило не повинно мати надмірний винос назад відносно центра задньої осі та не має виходити вище контрольної лінії даху. Тому горизонтальну відстань від центра заднього колеса до крайньої задньої точки профілю прийнято близько 980 мм. Це дає запас відносно граничного виносу 1050 мм і залишає місце для ендплейтів.

Вертикальне положення профілю задавалося за CAD-моделлю задньої частини кузова. Профіль розміщено із зазором близько 60 мм від опорної точки на моделі. При цьому враховано, що лінія даху продовжується вперед і залишається вищою за антикрило, тому прийняте положення не виводить конструкцію за допустимий габарит по висоті.

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

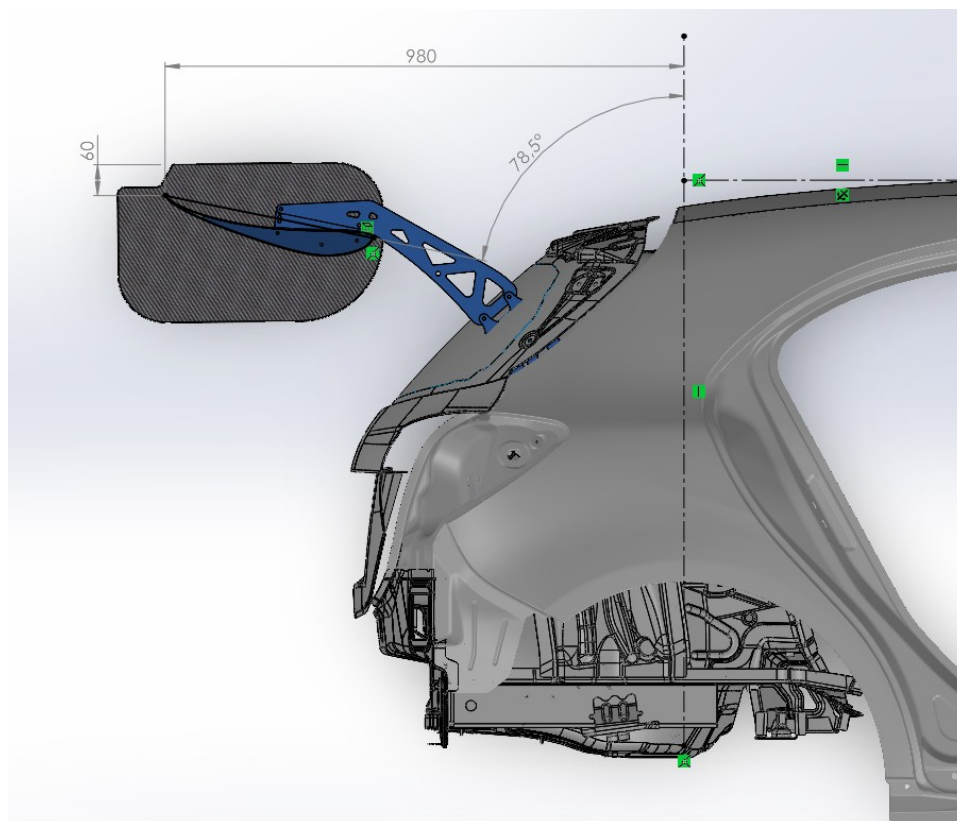
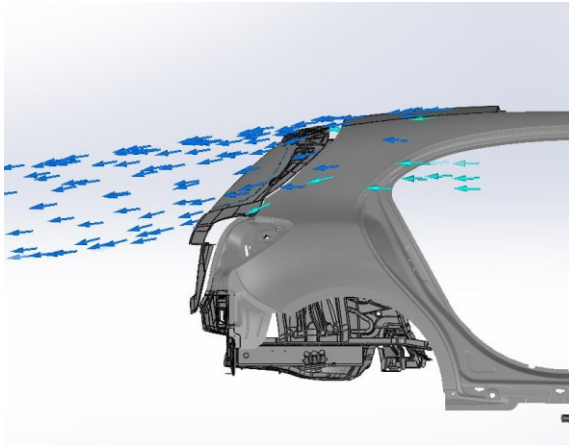


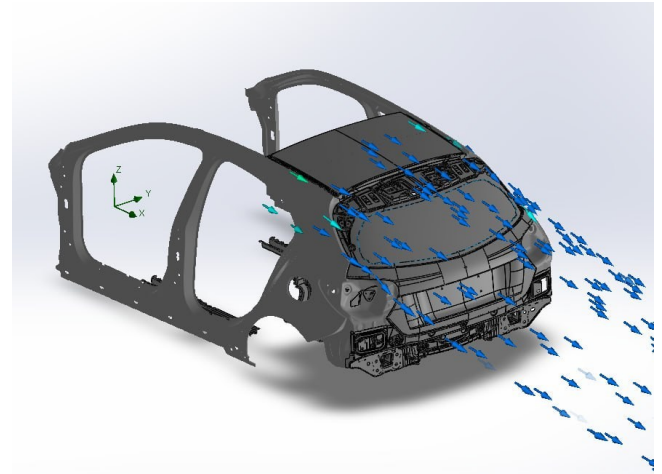
Рисунок 3.1. Схема розташування антикрила

3.2. Послідовність аеродинамічного компонування

Проектування антикрила виконувалося поетапно. Спочатку через SolidWorks Flow Simulation був прогнаний стандартний кузов автомобіля без антикрила. Це дало змогу побачити, куди приблизно прямує потік у задній частині кузова і де він залишається найменш збуреним. Така попередня оцінка потрібна, щоб не розміщувати профіль навмання, а орієнтуватися на реальну картину обтікання.



а)



б)

Рисунок 3.2. Візуалізація обтікання задньої частини кузова в Solidworks Flow Simulation: а) вид збоку; б) ізометричний вид.

У попередньо заданих межах розташування, профіль розміщено так, щоб він візуально продовжував лінію даху, з нейтральним кутом встановлення.

Це положення також перевірено у Flow Simulation. Виявилось, що при такому нейтральному куті профіль майже не створює корисної притискної сили: над і під крилом не формується потрібна різниця тиску. Тому кут встановлення підбирався ітеративно.

З другої спроби вдалося виставити профіль так, що вже у початковому робочому положенні він створював близько 1200 Н притискної сили (рис. 3.1). Це значення прийнято як базове, від якого далі будувалася силова схема та система регулювання.

Щоб мати запас і змогу адаптувати крило під конкретну трасу та умови, у кронштейні профілю передбачено чотири положення: одне початкове та три додаткові. Кожне наступне положення збільшує кут атаки, а отже й притискну силу, доводячи її в крайньому положенні до цільового рівня близько 1800 Н. Зміна виконується перестановкою болтового з'єднання, без переробки самого профілю.

3.3. Загальна будова конструкції

Заднє антикрило встановлюється над задньою частиною кузова автомобіля. Загальна ширина крила становить 1700 мм, хорда профілю - 400 мм. Профіль розташований приблизно на 70 мм вище за найвищу точку даху, а горизонтальна відстань від центра задньої осі до крайньої точки профілю - близько 980 мм, що вкладається в регламентні обмеження TCR (винесення не більше ніж на 1050 мм від осі та висота не вище за кузов). Крило кріпиться лише до силових зон кузова болтами, без зварювання до кузова та вирізання його елементів (загальний вигляд на автомобілі - рис. 3.2).

У складеному вигляді (без автомобіля) конструкція складається з аеродинамічної частини - основного профілю з торцевими пластинами - та системи кріплення: кронштейна профілю з регулюванням кута, двох стійок swan-neck, двох основних стійок, опорних кронштейнів і фіксуючих пластин, верхньої поперечини, нижньої балки та просторових розпорок (рис. 3.6).

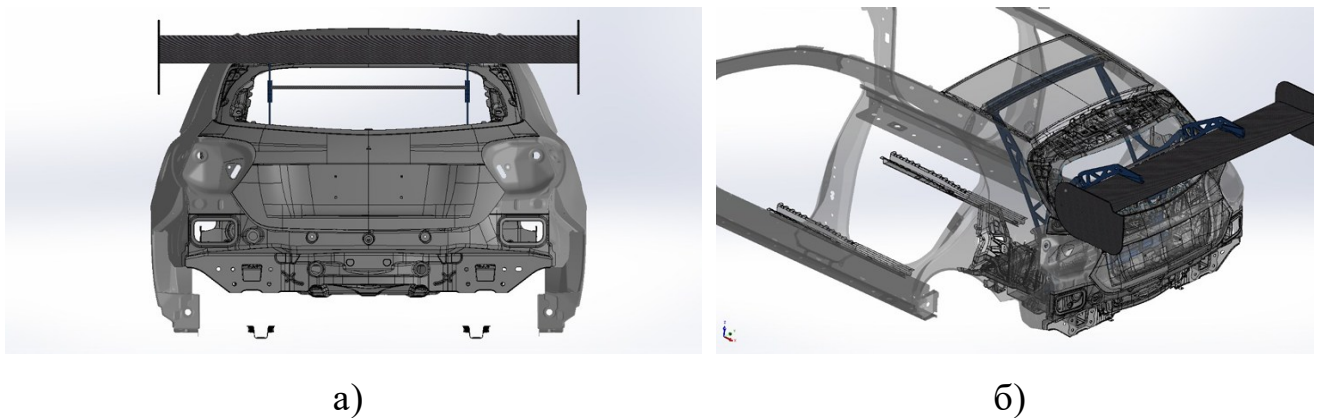
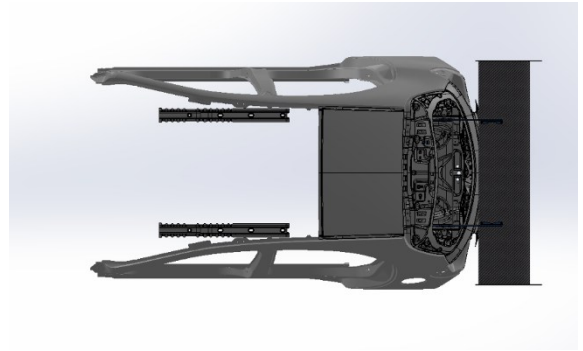


Рисунок 3.3. Загальний вигляд антикрила на автомобілі: а) ззаду; б) проєкція 3/4

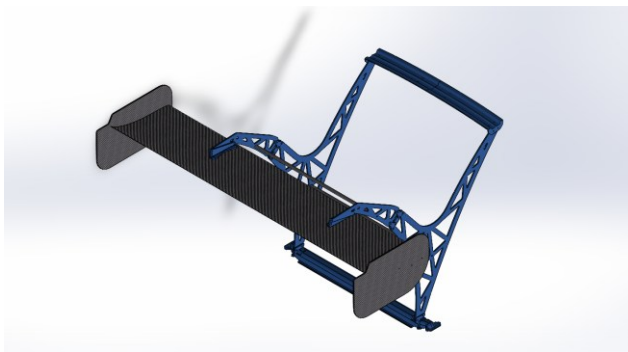


а)



б)

Рисунок 3.4. Розташування антикрила відносно кузова: а) збоку; б) зверху



а)



б)

Рисунок 3.5. Загальний вигляд конструкції: а) ізометричний вид ззаду; б) ізометричний вид спереду.

3.4. Принцип роботи та силова схема конструкції

Принцип роботи конструкції полягає у створенні притискної сили композитним профілем антикрила та передаванні цієї сили через металеву систему кріплення на задню частину кузова. Для автомобільного антикрила важливе не лише саме створення притискної сили, а й стабільність положення профілю під навантаженням. Через це конструкція повинна мати достатню жорсткість у вертикальному та поздовжньому напрямках.

Силовий шлях у прийнятій конструкції являє собою послідовне передавання навантаження від профілю антикрила через внутрішні закладні деталі на кронштейн регулювання та swan-песк-конструкцію, звідки зусилля через проміжні

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кронштейни надходить до основної стійки і остаточно розподіляється через систему поперечин на задні силові зони кузова.

Важливо, що профіль не кріпиться безпосередньо до swan-neck-конструкції. Спочатку він з'єднується з окремим кронштейном профілю, у якому реалізовано ступінчасте регулювання кута встановлення. Після вибору потрібного положення кронштейн фіксується болтовим з'єднанням, а навантаження далі передається на swan-neck конструкцію.

Між swan-neck-конструкцією і основною стійкою передбачені опорні кронштейни. Вони виконують роль проміжного вузла, який забезпечує зручне складання, розбирання та передавання навантаження без виконання основної стійки і swan-neck як однієї складної деталі. Це також спрощує виготовлення та дає змогу окремо коригувати форму основної стійки під час оптимізації.

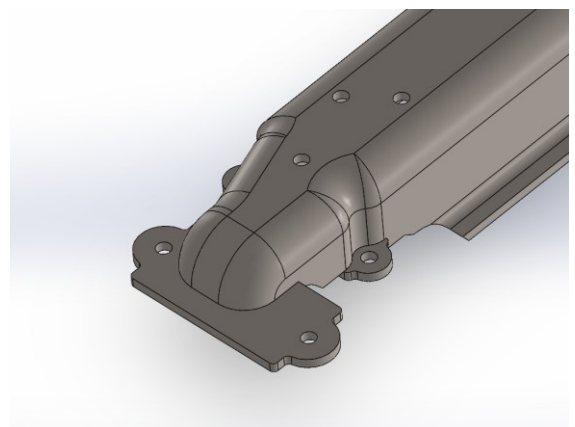
Прийнята схема відповідає вимозі не послаблювати основні несучі елементи кузова. У класі Pro R2 регламент обмежує втручання в силову структуру автомобіля, тому конструкція антикрила повинна кріпитися до задніх жорстких зон без вирізання або ослаблення лонжеронів [4].

3.5. Несучі елементи системи кріплення

3.5.1. Нижня балка



а)

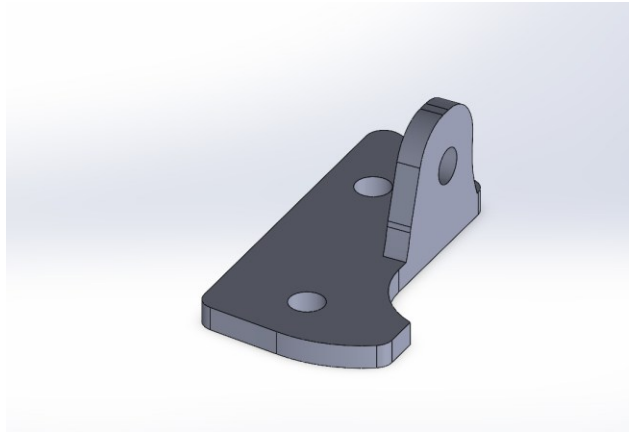


б)

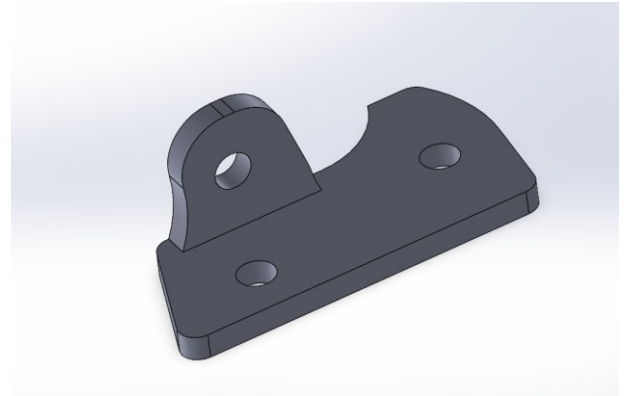
Рисунок. 3.6. Нижня балка, що кріпиться між лонжеронами: а) ізометричний вид; б) приближена зона кріплень

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нижня балка з'єднує задні лонжерони та формує нижню опорну частину системи кріплення антикрила. Її геометрію підібрано за формою задньої частини кузова. Середня частина балки має простий профільний переріз, а на кінцях передбачені фланцеві наконечники з отворами під болти М6 для кріплення до лонжеронів.

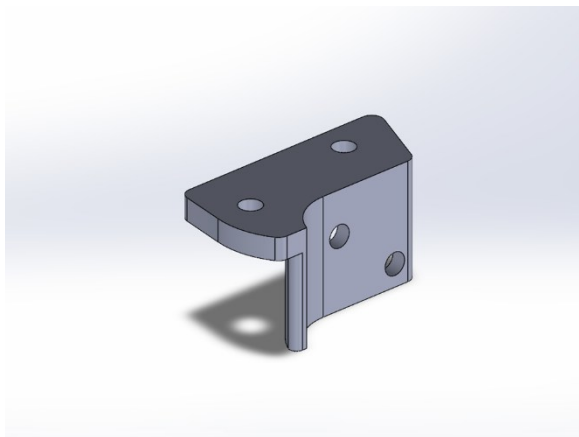


а)

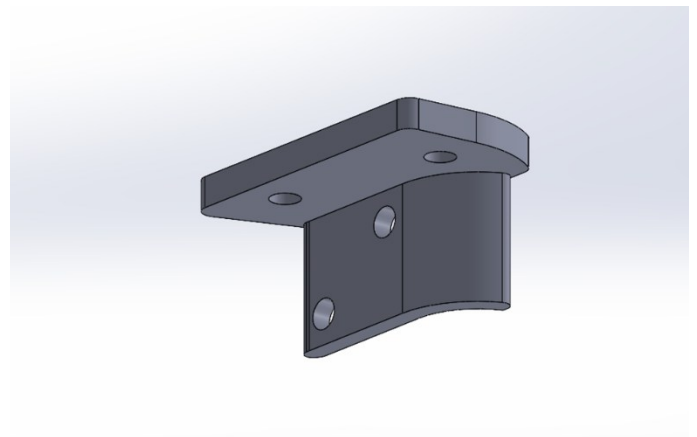


б)

Рисунок 3.7. Кронштейн до нижньої балки, внутрішній: а) ізометричний вид; б) вид збоку



а)



б)

Рисунок 3.8. Кронштейн до нижньої балки, зовнішній: а) ізометричний вид; б) вид збоку

3.5.2 Верхня поперечина

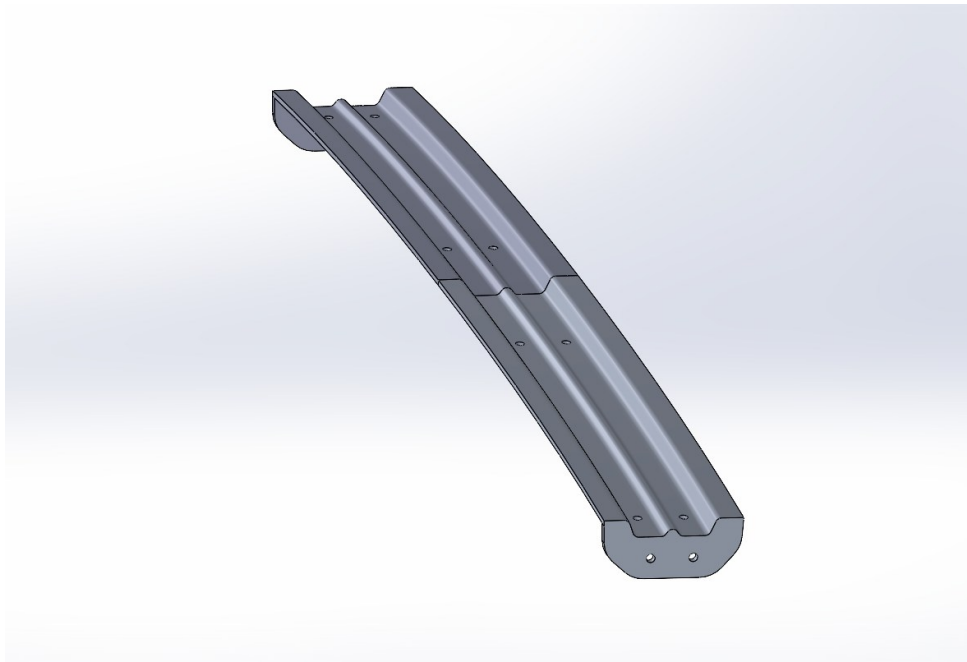


Рисунок 3.9. Верхня поперечина

Верхня поперечина зв'язує верхні вузли стійок із задньою частиною кузова і повторює лінію кузова. Вона має сталий переріз із поздовжніми ребрами та плавно вигнута по довжині; на кінцях передбачені лапки з отворами під болти М6.

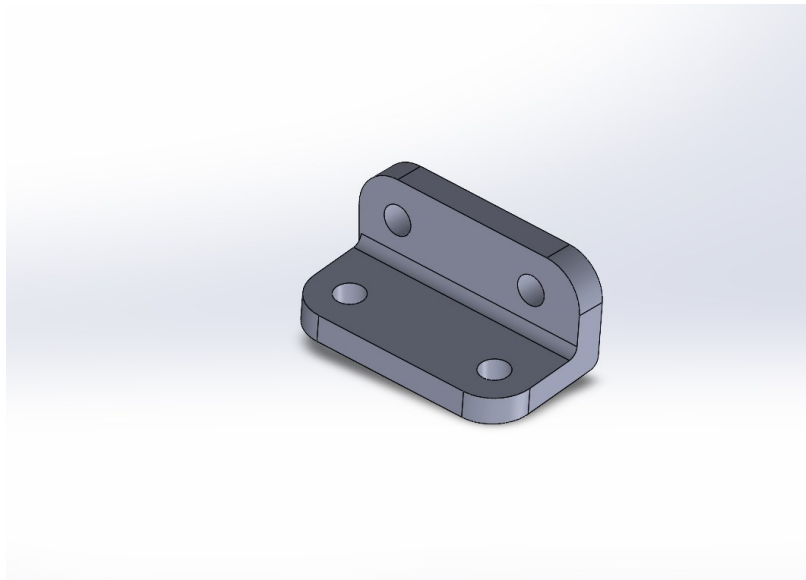


Рисунок 3.10. Кронштейн під кріплення основної стійки до верхньої поперечини

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.5.3. Основні стійки

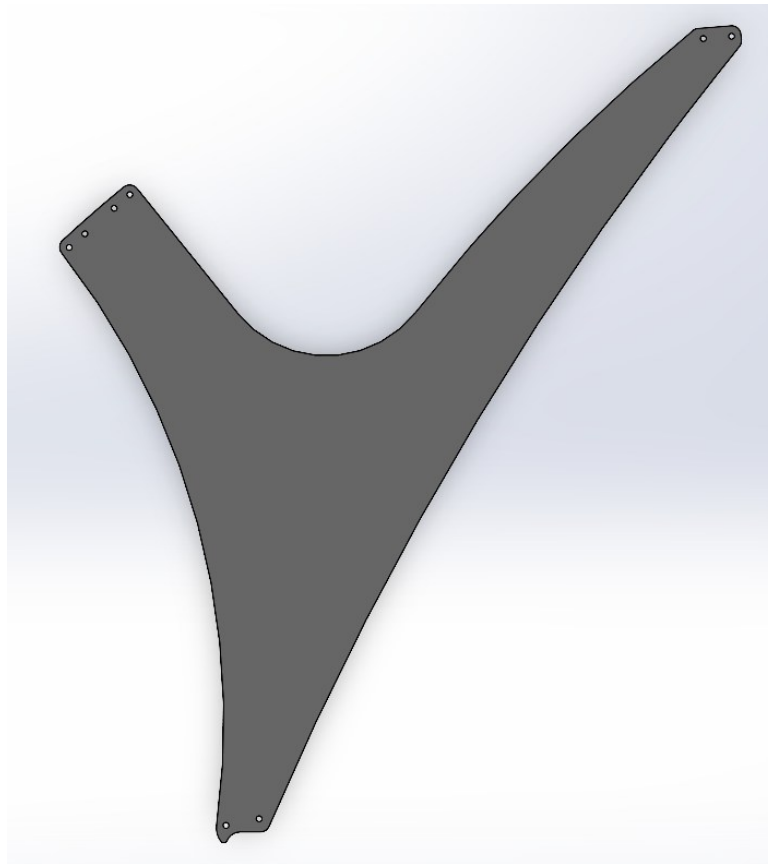


Рисунок 3.11. Основні стійки конструкції

На початковому етапі основні стійки прийнято як плоскі деталі У-подібної форми сталюї товщини 6 мм без отворів полегшення. Така геометрія використовується як базова заготовка для подальшого топологічного розрахунку та об'єднання конструкції.

Отвори кріплення виконуються під болти М6, а центральний отвір - під болт М8. Загальні пропорції та розташування стійок прийнято з урахуванням референсів трекових антикрил, зокрема конструктивної логіки Volkswagen Golf GTI TCR.

3.5.4. Стійки swan-neck

Оскільки профіль антикрила працює у перевернутому положенні, основною робочою поверхнею є нижня поверхня профілю. Саме в цій зоні формується область пониженого тиску, яка створює основну частину притискної сили. Верхня

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поверхня при цьому працює як сторона підвищеного тиску. З цієї причини для конструкції обрано верхню схему кріплення типу swan-neck, яка не перекриває нижню робочу поверхню профілю та менше порушує обтікання в найбільш важливій зоні.

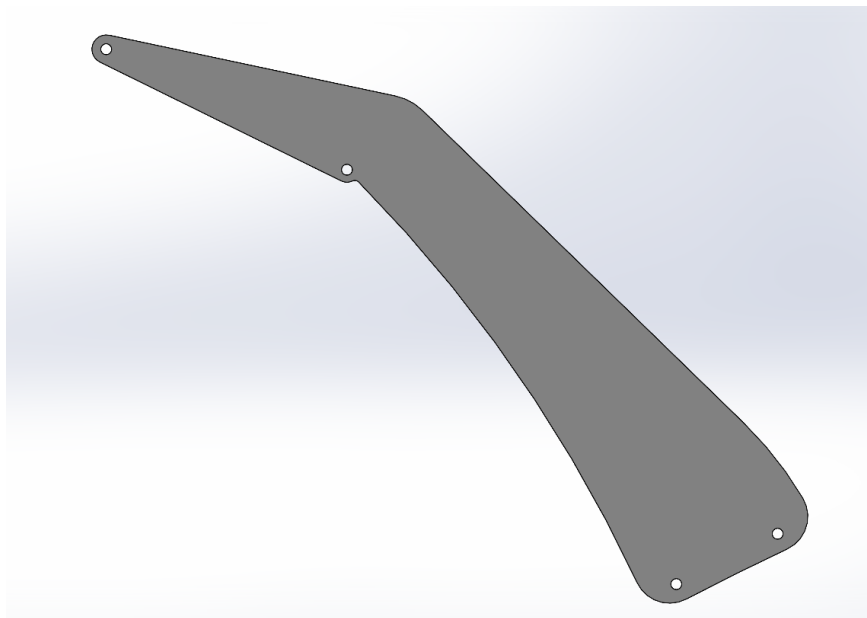


Рисунок 3.12. Стійки swan-neck

3.5.5. Опорні кронштейни та фіксуючі пластини

Між стійками swan-neck та основними стійками встановлено чотири фіксуючі пластини, які проходять через задню світлопрозору панель. Для цього штатне скло доцільно замінити прозорою панеллю з монолітного полікарбонату, оскільки такий матеріал можна механічно обробляти та вирізати під необхідні отвори. Отвори під елементи кріплення виконуються за попередньо підготовленим шаблоном, після прив'язки конструкції до геометрії кузова і багажного відсіку.

З боку основного профілю антикрила передбачено опорні кронштейни, які з'єднують профіль із стійками swan-neck. У цих кронштейнах виконано ряд отворів для ступінчастого регулювання кута встановлення профілю. Регулювання здійснюється з кроком 3 градуси. За чотирьох фіксованих положень діапазон зміни кута між крайніми положеннями становить 9 градуси.

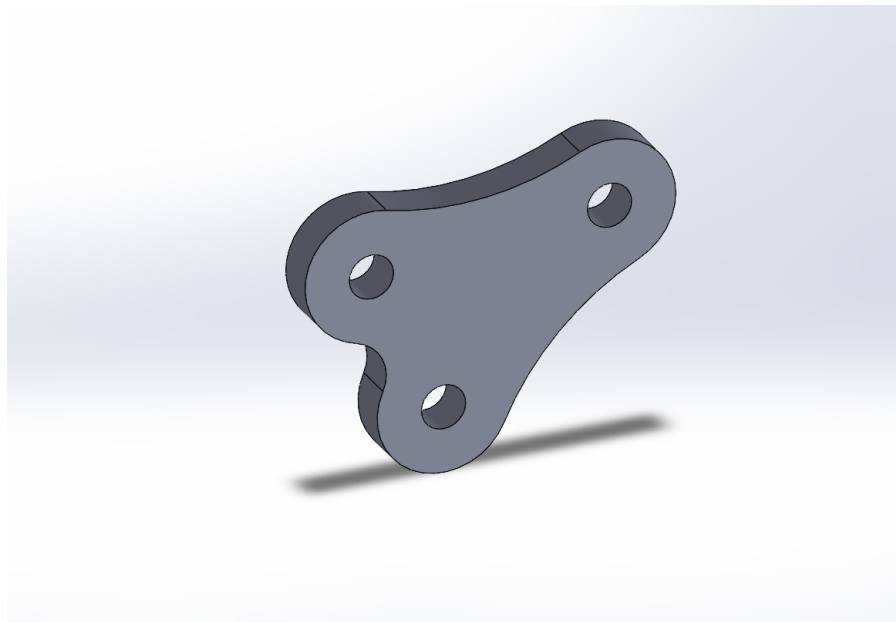
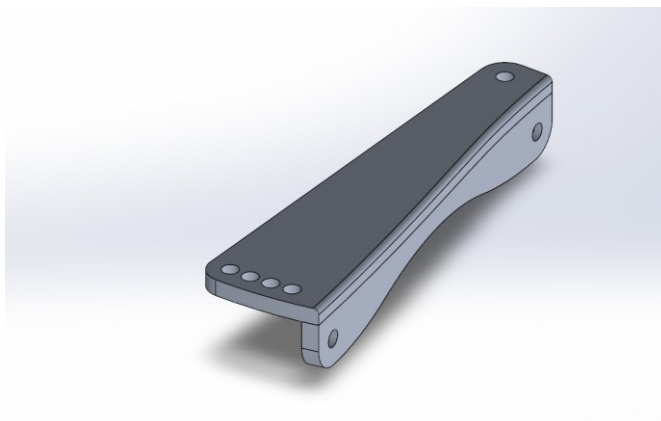
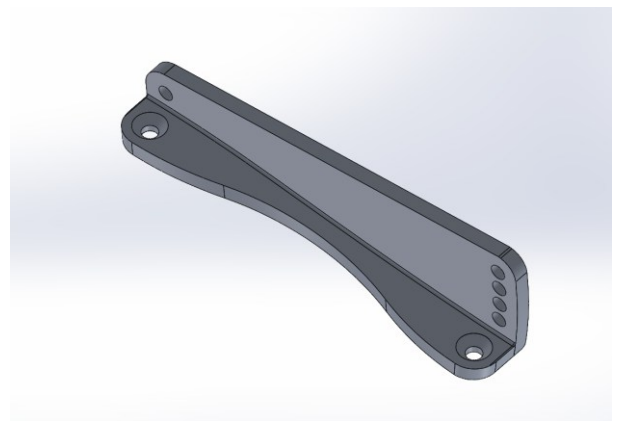


Рис. 3.13. Фіксуючі пластини



а)



б)

Рисунок. 3.14. Кронштейн, що кріпиться до самого профілю анти-крила: а) вид з зовнішнього боку; б) вид внутрішнього боку

3.5.6. Розпірки

Дві просторові розпірки діаметром 16 мм з'єднують стійки swan-neck з основними стійками та додатково підвищують жорсткість системи. Оскільки ці елементи переважно працюють на розтяг і стиск, для них прийнято пултрудовану карбонову трубу.

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для кріплення до металевих вузлів на кінцях труб передбачено вклеєні алюмінієві наконечники з різьбою М8. Це дозволяє зберегти малу масу розпірки та водночас забезпечити надійне різьбове з'єднання.

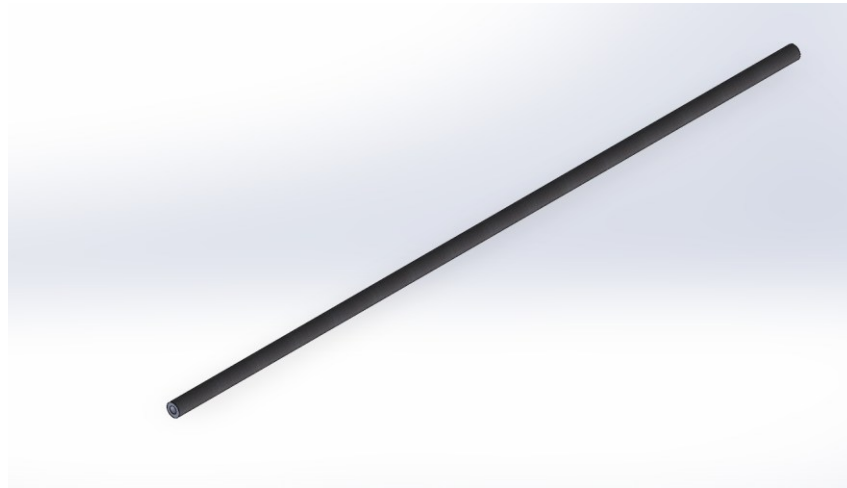


Рис. 3.15. Розпорки стійок

3.6. Аеродинамічні елементи

3.6.1. Основний профіль

Основний профіль антикрила виконано на базі аеродинамічного профілю S1223 у перевернутому положенні. У такому встановленні робоча нижня поверхня профілю створює зону пониженого тиску, тому результуюча аеродинамічна сила спрямована донизу. Розмах профілю становить 1700 мм, хорда - 400 мм, а площа в плані - 0,68 м.

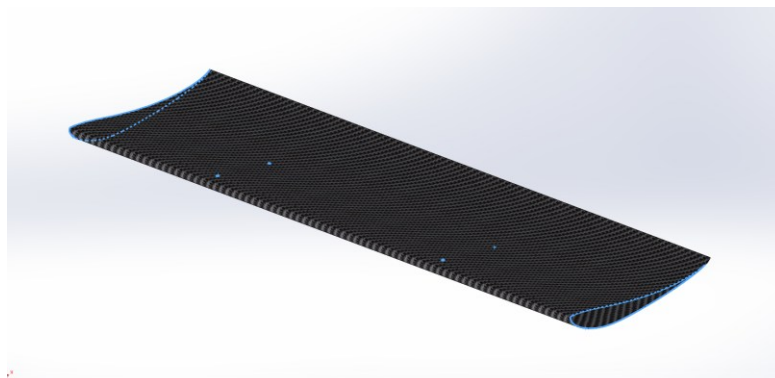


Рис. 3.16. Карбонова оболонка анти-крила

Конструктивно профіль виконано як сендвіч-панель. Зовнішні обшивки формуються з вуглепластику, а всередині розміщується осердя зі структурної піни.

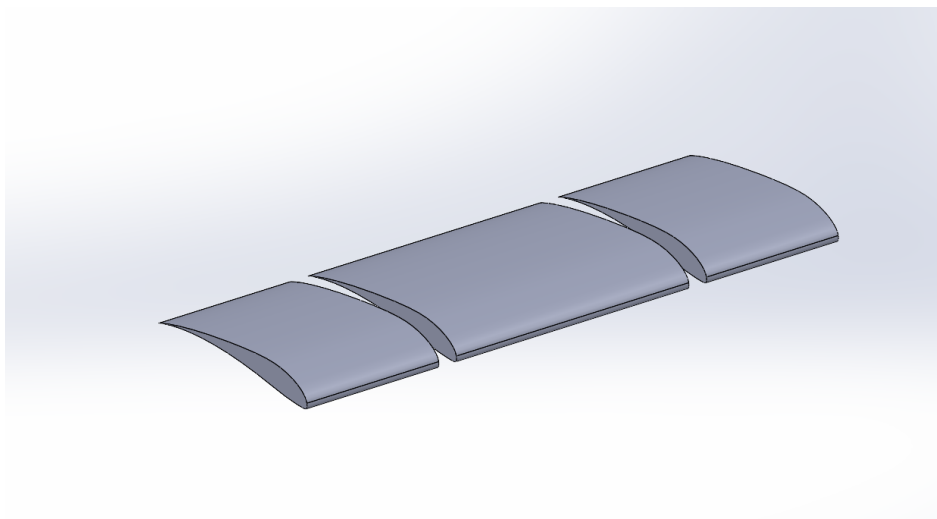


Рис. 3.17. Наповнювач, що задає форму анти-крила

3.6.2. Закладні елементи

У зонах кріплення передбачені закладні елементи з EN AW-6082-T6, форма яких повторює контур профілю антикрила. Вони заформовуються в конструкцію та призначені для передавання навантаження від профілю на кронштейни кріплення.

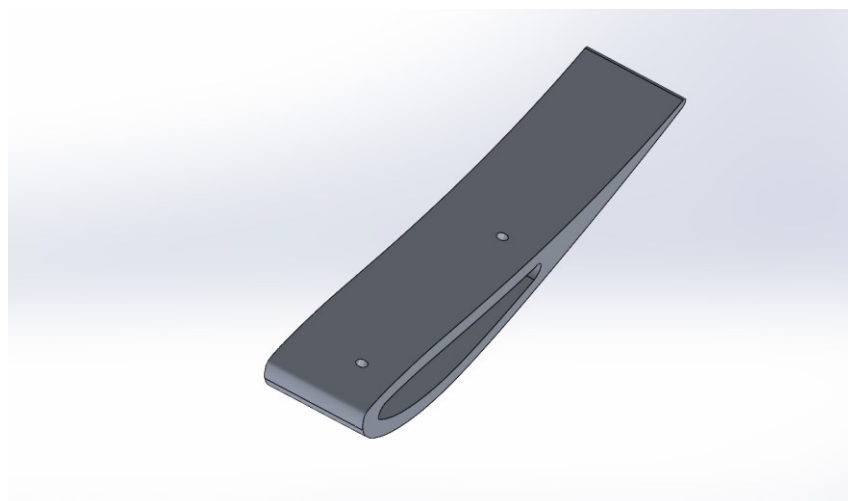


Рис. 3.18. Центральні закладні під кронштейн на анти-крилі

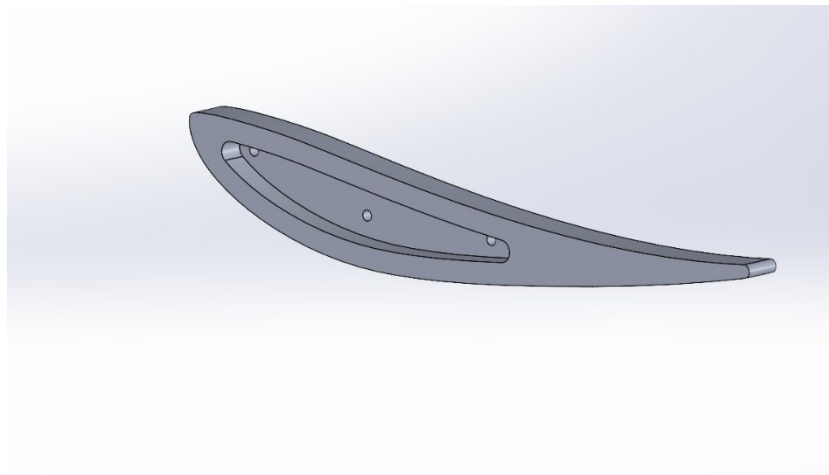
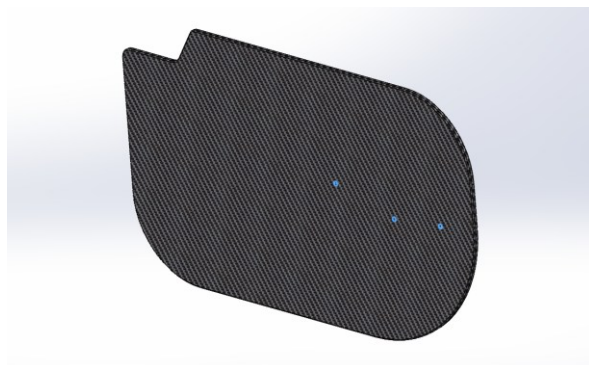


Рис. 3.19. Торцеві закладні

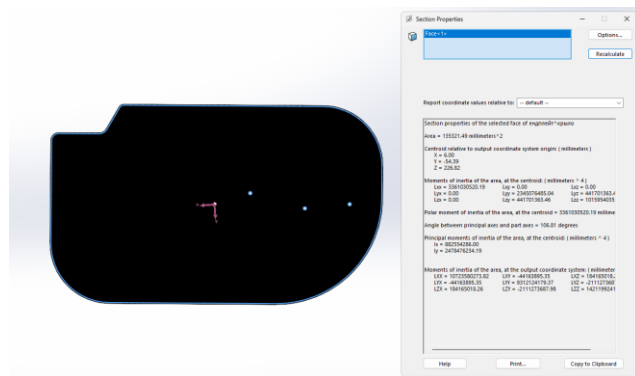
3.6.3. Торцеві пластини (енд-плейти)

Торцеві пластини встановлюються на кінцях основного профілю антикрила. Їхнє призначення - зменшити перетікання повітря через торці профілю та знизити втрати, пов'язані з утворенням кінцевих вихорів. Для крил малого видовження таке рішення є доцільним, оскільки торцеві пластини підвищують ефективність роботи профілю [8, 9].

Конструктивно ендплейти виконані як тонкі вуглепластикові панелі довжиною близько 300 мм і товщиною приблизно 4,6 мм. Площа бічної проекції однієї пластини становить близько 15500 мм. Кріплення до основного профілю виконується трьома болтами М5 з кожного боку через закладні елементи, передбачені в торцях профілю.



а)



б)

Рисунок. 3.20. Торцева пластина: а) ізометрія; б) загальна геометрія та характеристики перерізу

Таблиця 3.2. Болтові з'єднання конструкції антикрила

Вузол	Тип кріплення	Кількість, шт	Призначення
Ендплейт до профілю	M5	3 на сторону / 6 загалом	Притискання ендплейта до торця
Профіль до кронштейна профілю	потайні M6	2 на сторону / 4 загалом	Передавання навантаження на кронштейн
Кронштейн профілю до swan-neck	M6	2 на сторону / 4 загалом	Фіксація положення регулювання
Swan-neck до опорних кронштейнів	M6	2 на сторону / 4 загалом	Передавання навантаження на стійку
Основні стійки до кронштейнів	M6	8 на дві стійки	Кріплення стійок до системи
Верхня поперечина до кузова	M6	8 загалом	Кріплення верхнього вузла
Нижня поперечина до кузова	M6	8 загалом	Кріплення нижньої балки
Кронштейни до нижньої поперечини	M6	2×2 + 2×1	Кріплення нижніх опорних елементів
Карбонові розпірки	M8	4 загалом	Просторове підсилення

3.7 Топологічна оптимізація стійок

Початкову геометрію основної стійки та стійки типу swan-neck прийнято у вигляді суцільних пластинчастих деталей сталюї товщини 6 мм (рис. 3.11, 3.12).

Така форма зручна для первинної побудови розрахункової моделі, однак має надлишкову масу, оскільки частина матеріалу розташована в ділянках, які майже не беруть участі у передаванні навантаження.

Для уточнення форми деталей надалі виконується топологічна оптимізація. Вона дозволяє визначити малонавантажені зони та залишити матеріал переважно вздовж основних напрямків передавання зусиль. Завдяки цьому можна зменшити масу стійок без необґрунтованого зниження жорсткості, а також покращити розподіл напружень у найбільш навантажених ділянках.

3.7.1 Оптимізація основної стійки

Для зменшення маси основної стійки було виконано топологічне дослідження в SolidWorks Simulation. Початково стійка мала вигляд суцільної пластинчастої деталі товщиною 6 мм з матеріалу EN AW-6082-T6. Маса такої деталі до оптимізації становила 2,56 кг.

У розрахунковій схемі закріплення задавалися по отворах, через які стійка з'єднується з нижньою балкою та верхньою поперечиною. Навантаження прикладалися до отворів у верхній частині деталі вертикально вниз. Для розрахунку прийнято силу 4500 Н, тобто навантаження із запасом відносно робочого режиму. Зони навколо всіх отворів були задані як такі, що повинні зберігати свою геометрію, оскільки саме через них виконується болтове кріплення.

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

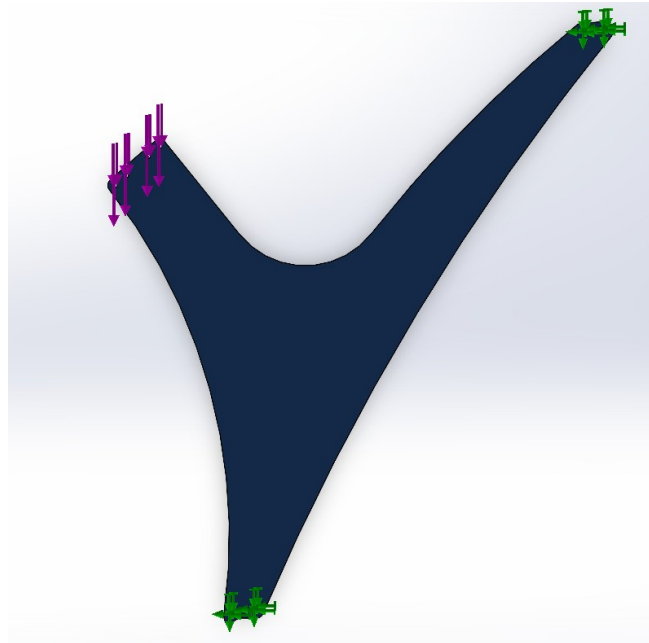


Рисунок 3.21. Схема закріплення основної стійки та прикладання зусиль

Як ціль дослідження було обрано режим Best stiffness to weight (найкраща жорсткість до ваги) зі зменшенням маси до 50 %. У такій постановці програма не створює готову форму деталі, а показує, які ділянки найбільше беруть участь у передаванні навантаження, а які можна розглядати для подальшого полегшення. Тобто результат топології використовується як підказка для конструктора, а не як остаточна геометрія.

Сітку скінченних елементів побудовано на основі кривизни геометрії. Її прийнято точнішою за стандартну, запропоновану програмою, щоб краще врахувати форму біля отворів, переходів і ділянок можливої концентрації напружень.

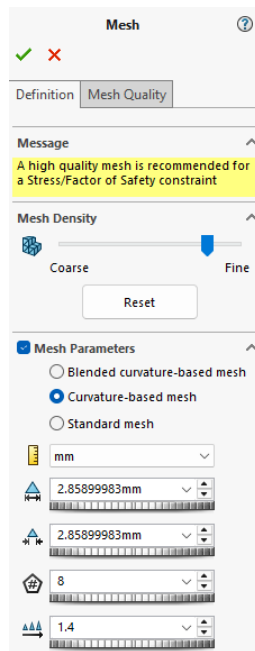


Рисунок 3.22. Параметри сітки для топологічного дослідження основної стійки

За результатами топологічного дослідження отримано розподіл матеріалу в деталі. Жовтим кольором позначено зони, які бажано залишити, оскільки вони найбільше впливають на жорсткість стійки при заданих навантаженнях. При заданому зменшенні маси на 50 % програма показала основні силові напрямки та ділянки, з яких матеріал можна частково прибрати.

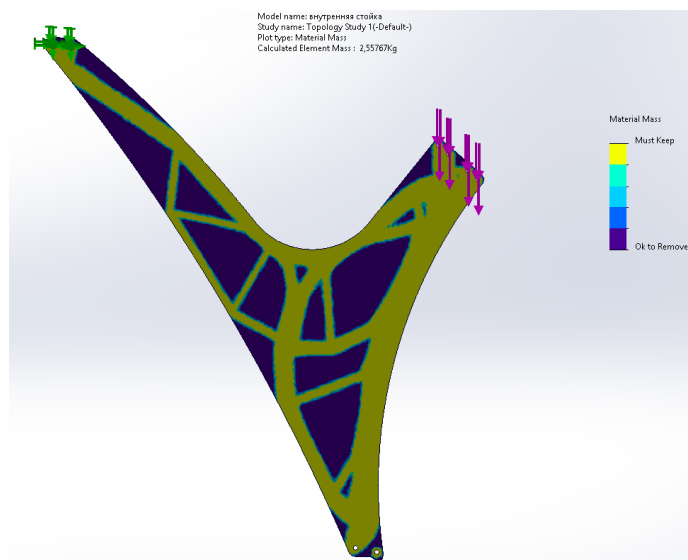
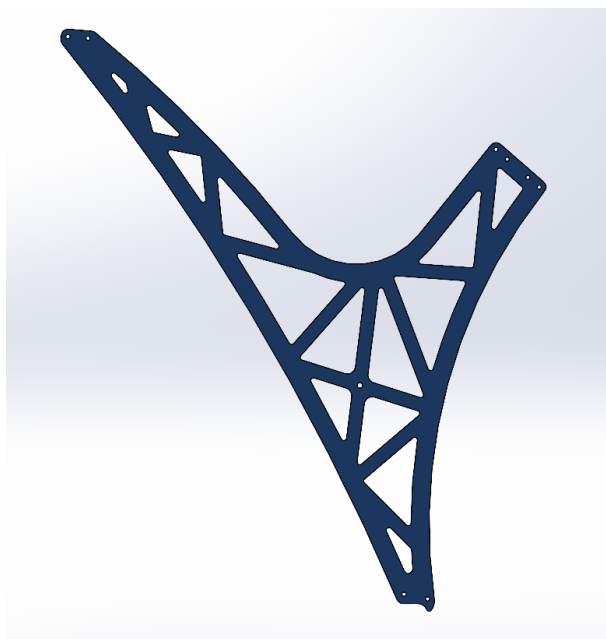


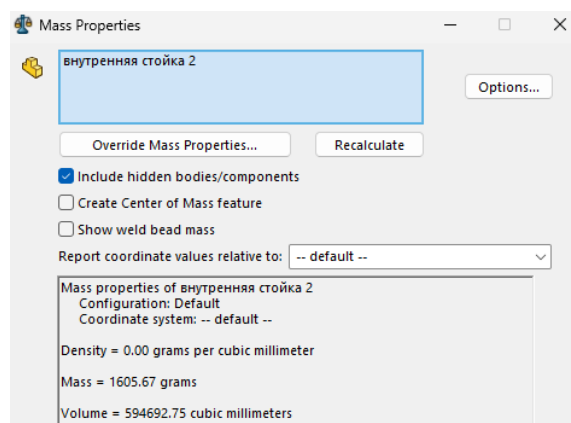
Рисунок 3.23. Результат топологічної оптимізації основної стійки

Орієнтуючись на отриману картину, форму стійки було доопрацьовано вручну. При цьому враховувалися не тільки результати SolidWorks, а й базова логіка опору матеріалів: матеріал залишено біля отворів, по краях деталі та вздовж основних напрямків передавання зусиль. У центральних менш навантажених ділянках виконано вирізи полегшення з плавними переходами, щоб не створювати різких концентраторів напружень.

Після ручного доопрацювання маса основної стійки становить 1605,67 г, тобто приблизно 1,61 кг. Порівняно з початковою масою 2,56 кг зменшення становить близько 0,95 кг, або приблизно 37 %. Остаточна маса не зменшена рівно на 50 %, оскільки в реальній геометрії було залишено додатковий матеріал біля отворів і силових перемичок для забезпечення жорсткості та технологічності деталі.



а)



б)

Рисунок 3.24. Оптимізована геометрія основної стійки: а) геометрія; б) масові характеристики

3.7.2 Оптимізація стійки swan-neck

Для стійки типу swan-neck використано аналогічний підхід. Початкова маса однієї такої стійки становила 0,49 кг. Для цієї деталі попередньо прийнято матеріал

EN AW-7075-T651, оскільки вона є фрезерованим незварним елементом і працює у відповідальному вузлі кріплення профілю антикрила.

Закріплення задавалися в місцях з'єднання з фіксуючими пластинами. Навантаження прикладалося до отворів у вертикальному напрямку вниз. Як і для основної стійки, області навколо отворів були задані як зони збереження геометрії, оскільки ці ділянки формують болтові з'єднання та не можуть бути видалені під час оптимізації.

За результатами топологічного дослідження було визначено ділянки, з яких можна прибрати частину матеріалу без суттєвого погіршення роботи деталі. Отриманий результат також використовувався як орієнтир для подальшого ручного доопрацювання форми.

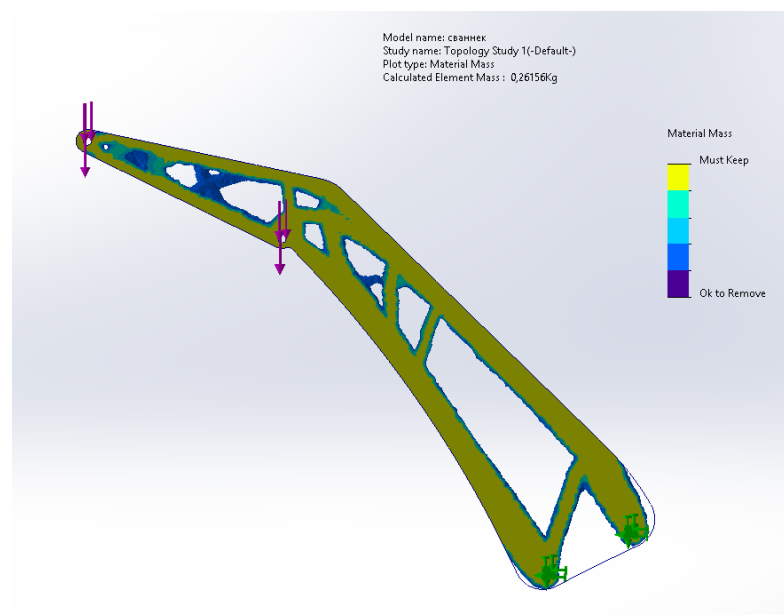


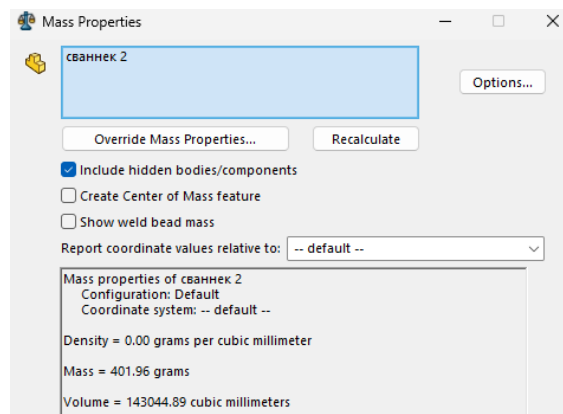
Рисунок 3.25. Результат топологічної оптимізації стійки swan-neck

Після конструктивного доопрацювання геометрії маса стійки swan-neck становить 401,96 г, тобто приблизно 0,402 кг. Порівняно з початковою масою 0,49 кг зменшення становить близько 88 г, або приблизно 18 %. Менший відсоток полегшення пояснюється тим, що деталь має компакту початкову форму, а значна частина її об'єму припадає на зони кріплення, які потрібно залишати жорсткими.

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)

Рисунок 3.26. Оптимізована геометрія стійки swan-neck: а) геометрія; б) масові характеристики

Таким чином, топологічне дослідження використовувалося як інструмент для пошуку раціонального розподілу матеріалу. Остаточна форма деталей приймалася після ручного доопрацювання з урахуванням силового шляху, отворів кріплення, плавності переходів і технологічності виготовлення. Такий підхід дозволив зменшити масу стійок без необґрунтованого послаблення конструкції.

4. СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

4.1 Мета та задачі моделювання

Після розроблення конструкції антикрила необхідно перевірити, яку притискну силу створює прийнята геометрія профілю в потоці повітря, а також які навантаження виникають у силових елементах кріплення. Для цього в цьому розділі передбачено два етапи розрахунку: аеродинамічне моделювання в SolidWorks Flow Simulation та подальшу скінченно-елементну перевірку

Аеродинамічний розрахунок виконується для чотирьох положень регулювання кута встановлення профілю. Такий підхід дозволяє оцінити зміну притискної сили та сили опору залежно від положення антикрила. Після порівняння результатів обирається розрахункове положення, яке використовується для формування навантаження у міцнісному розрахунку.

Основними задачами розділу є визначення вертикальної та поздовжньої складових аеродинамічної сили, порівняння чотирьох положень регулювання, вибір робочого положення профілю, формування розрахункового навантаження з урахуванням коефіцієнта перевантаження, а також оцінка напружень, переміщень і запасу міцності силових елементів конструкції.

У розрахунках використано наступні позначення: Притискну силу D_f приймають як модуль вертикальної складової аеродинамічної сили F_z , отриманої у Flow Simulation:

$$D_{np} = |F_z| \quad (4.1)$$

Сила опору позначається F_x . Умовну аеродинамічну ефективність положення оцінюють як відношення притиску до опору

$$E_a = \frac{D_f}{F_x} \quad (4.2)$$

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2 Вихідні дані для аеродинамічного моделювання

Розрахункова швидкість руху автомобіля приймається рівною 60 м/с. Потік повітря задається в напрямку поздовжньої осі автомобіля. Вертикальна вісь використовується для визначення притисної сили. Регулювання кута встановлення реалізоване через кронштейн профілю та задається конфігураціями у SolidWorks. У конструкції передбачено чотири положення регулювання з кроком 3° , тобто повний діапазон між крайніми положеннями становить $69,5^\circ$ - $78,5^\circ$

4.3 Розрахункова область Flow Simulation

Для моделювання використовується зовнішня розрахункова область, яка охоплює задню геометрію автомобіля та встановлене антикрило. Розміри області мають бути достатніми для коректного формування потоку перед профілем і за ним. Особливо важливо залишити достатній простір позаду антикрила, оскільки саме там формується збурений потік.

У розрахункову модель включаються задня частина кузову автомобіля, основний профіль антикрила, ендплейти, стійки та елементи кріплення. Дрібні елементи, які не мають суттєвого впливу на загальну картину обтікання, можуть бути спрощені. При цьому основна геометрія профілю та ендплейтів має бути збережена.

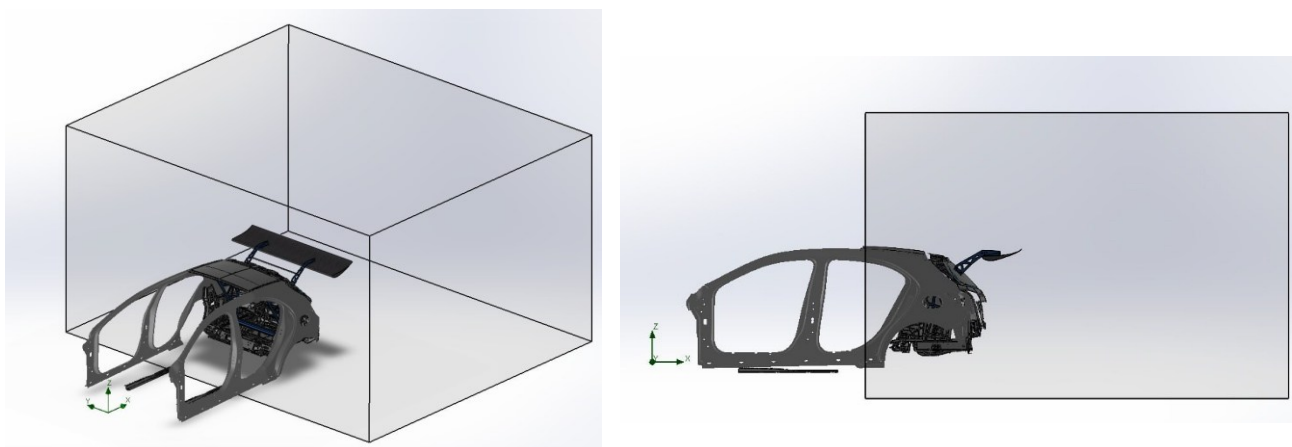
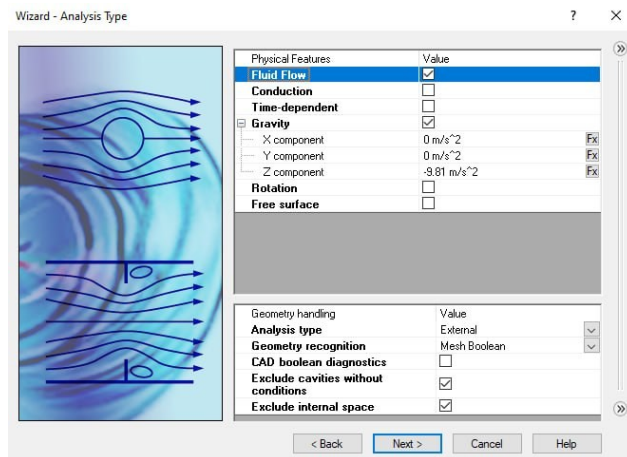


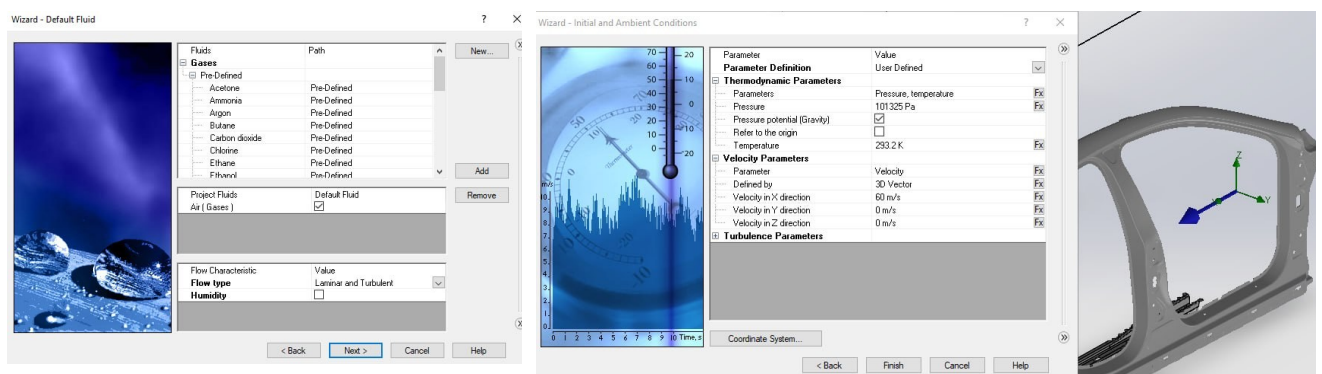
Рисунок 4.1. Налаштування розрахункової області аеродинамічного моделювання

4.4 Граничні умови аеродинамічного розрахунку

Розрахунок виконується для зовнішнього обтікання повітрям. Швидкість потоку приймається рівною 60 м/с. Повітря розглядається як робоче середовище. Поверхні автомобіля та антикрила задаються як тверді нерухомі стінки. Для кожного положення регулювання створюється окрема конфігурація моделі або окремий проєкт Flow Simulation. Це необхідно для коректного порівняння результатів при однакових граничних умовах. Основними результатами є вертикальна сила F_z , поздовжня сила опору F_x , розподіл тиску та картина течії в зоні антикрила.



а)



б)

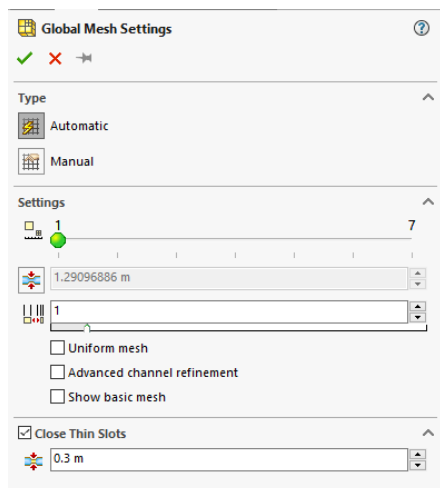
в)

Рисунок 4.2. Основні налаштування Wizard в Flow Simulation: а) задання гравітації, сітки та виключення з розрахунку внутрішніх областей; б) задання повітря для основного потоку; в) задання швидкості 60 м/с

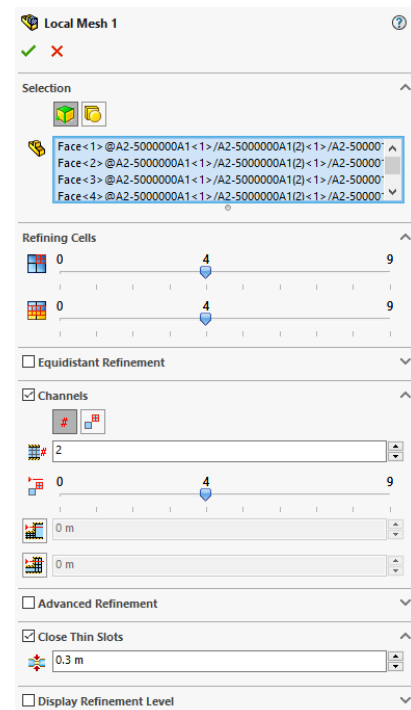
4.5. Сітка та цілі аеродинамічного моделювання

Сітка розрахункової моделі повинна забезпечувати достатню деталізацію саме в зоні антикрила, оскільки ця область є основною для визначення аеродинамічних характеристик. Найбільш важливими ділянками є передня та задня кромки профілю, зона торцевих пластин, місця кріплення профілю, а також простір за антикрилом, де формується слід потоку.

Для зменшення часу розрахунку глобальну сітку доцільно прийняти більш грубою, оскільки повна модель автомобіля має складну геометрію, велику кількість поверхонь, отворів і дрібних елементів. При цьому необхідна точність у робочій зоні забезпечується не загальним ущільненням усієї моделі, а локальним згущенням сітки біля антикрила та поверхонь, які безпосередньо впливають на результат розрахунку. Такий підхід дозволяє зберегти прийнятний час моделювання і водночас отримати достатньо деталізовану картину потоку в зоні профілю.



а)



б)

Рисунок 4.3. Налаштування сітки: а) глобальна; б) локальна

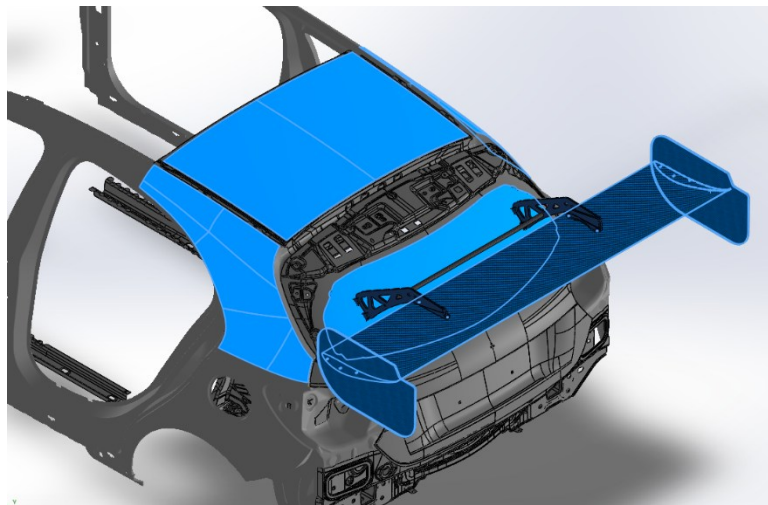


Рисунок 4.4. Поверхні, для яких задається локальна сітка

Для оцінки результатів задаються розрахункові цілі. Основними цілями для нашого розрахунку є сила по вертикальній осі F_z і сила опору F_x . Додатково можна виводити розподіл тиску, швидкості та лінії течії. Також знаючи параметри

Якщо програма дозволяє отримати коефіцієнти C_L і C_D , їх також доцільно зберегти для додаткового порівняння положень.

Таблиця 4.3. Цілі Flow Simulation

Ціль	Позначення	Призначення
Вертикальна сила	F_z	притискання
Поздовжня сила	F_x	опір
Тиск	p	карта тиску
Швидкість	V	поле швидкості
Лінії течії	-	відрив потоку

4.6. Результати Flow Simulation для чотирьох положень

Розрахунок виконується для чотирьох положень регулювання профілю. Для кожного положення визначається вертикальна сила F_z , сила опору F_x та співвідношення між притисковою силою і опором. Оскільки притиска сила може мати від'ємний знак залежно від прийнятої системи координат, у таблиці будемо використовувати її модуль D_f . Результати моделювання для чотирьох положень занесемо до таблиці 4.4.

Положення 1 відповідає початковому (нейтральному) куту встановлення, у якому профіль створює близько 1200 Н; кожне наступне положення збільшує кут атаки на 3° та має підвищувати притиск.

Таблиця 4.4. Результати Flow Simulation для положень регулювання

Положення	Кут	F_z , Н	D_f , Н	F_x , Н	E_a
1	78,5°	-1192.39941	1192,39941	236.7099279	5,037
2	75,5°	-1779.90722	1779.90722	464.6933286	3,860
3	72,5°	-1453.19752	1453.19752	409.5954874	3,547
4	69,5°	-1488.43728	1488.43728	484.4253056	3,07

З табл. 4.4 бачимо що положення 1 має найкращу умовну ефективність $E_a = 5,04$, оскільки при силі опору 236,7 Н, воно створює 1192,4 Н притискової сили, однак абсолютне значення притиску для цього положення є нижчим за цільовий рівень близько 180 кгс.

Найбільша притискна сила отримана у положенні 2 при куті $75,5^\circ$. У цьому випадку вертикальна сила становить $F_z = -1779,9 \text{ Н}$, тобто модуль притискною сили дорівнює $D_{пр} = 1779,9 \text{ Н}$. У перерахунку на кілограм-сили це становить:

$$D_{np} = \frac{1779,9}{9,81} = 181,4 \text{ кгс} \quad (4.3)$$

Саме тому положення 2 є найбільш обґрунтованим для подальшого розрахунку. Положення 3 та 4 не мають переваги порівняно з положенням 2: притискна сила в них менша, а співвідношення притиску до опору також погіршується.

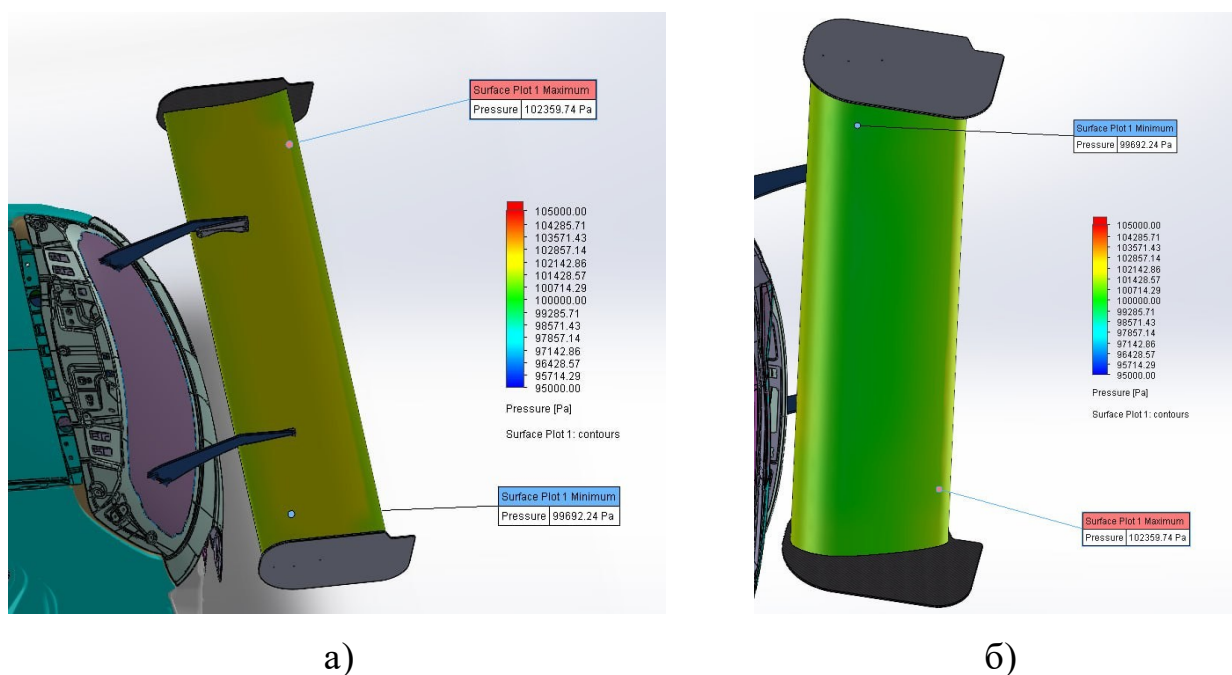
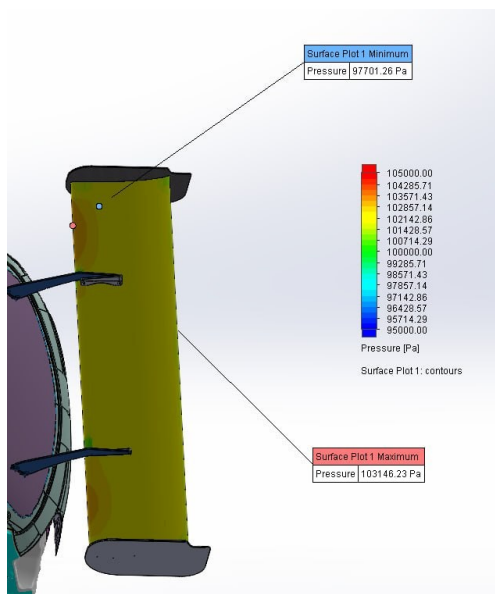
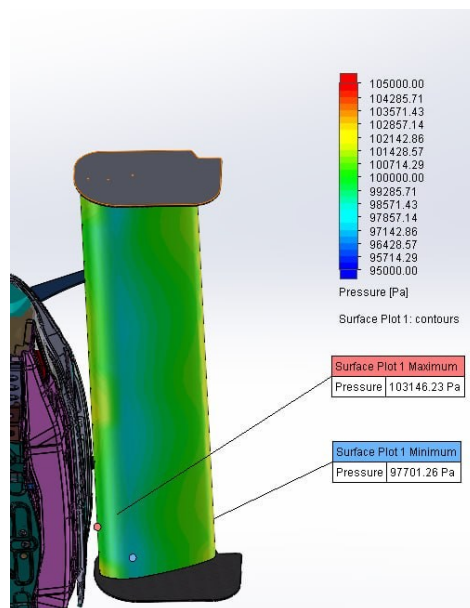


Рисунок 4.5. Розподіл тиску на антикрилі для положення 1: а) зверху антикрила; б) знизу антикрила

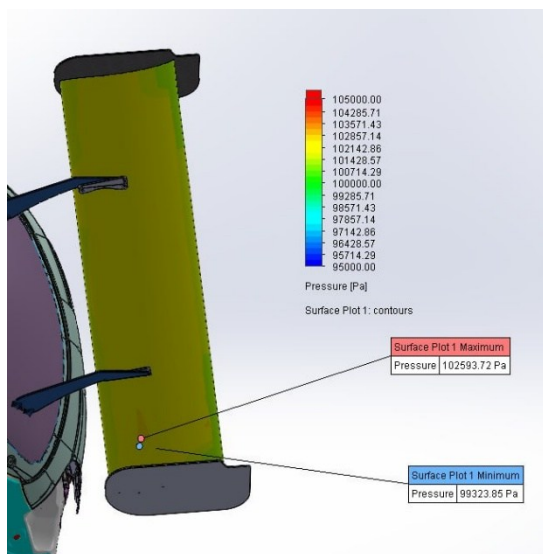


а)

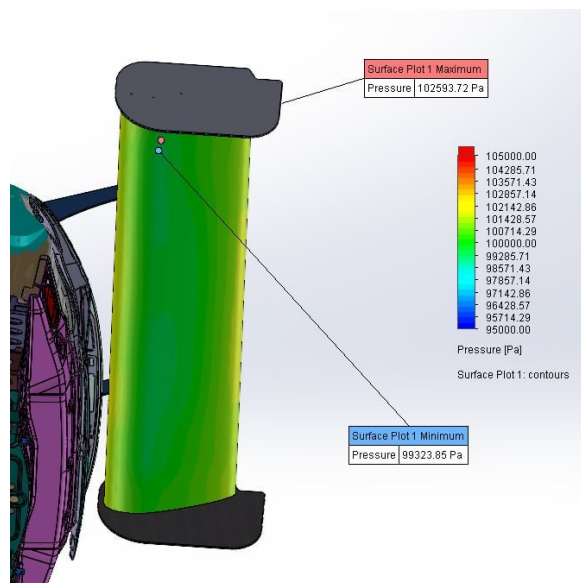


б)

Рисунок 4.6. Розподіл тиску на антикрилі для положення 2: а) зверху антикрила;
б) знизу антикрила

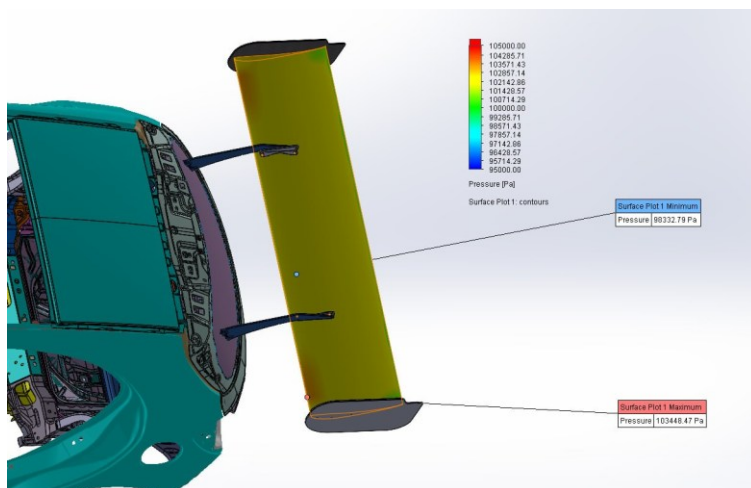


а)

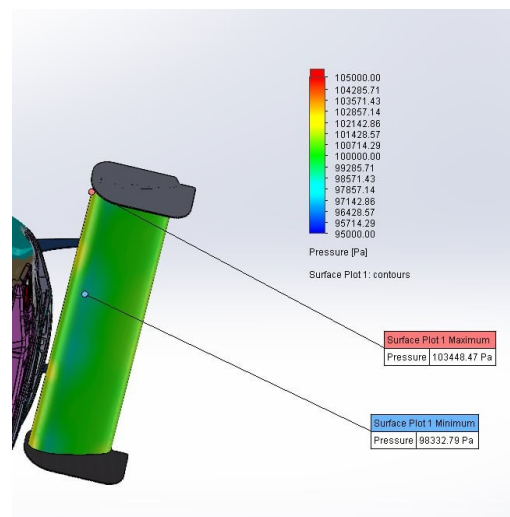


б)

Рисунок 4.6. Розподіл тиску на антикрилі для положення 3: а) зверху антикрила;
б) знизу антикрила

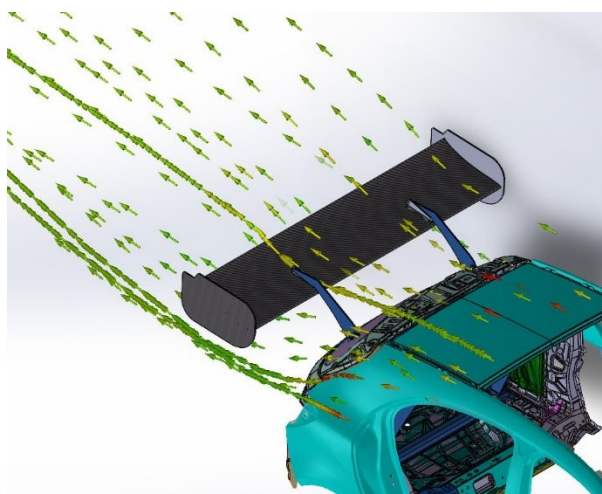


а)

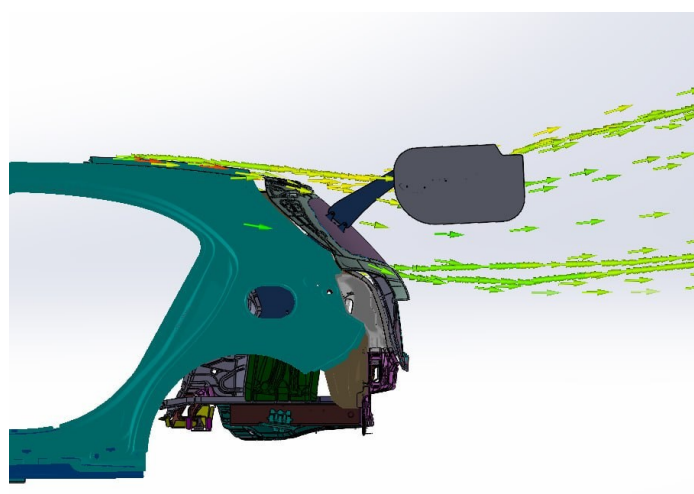


б)

Рисунок 4.7. Розподіл тиску на антикрилі для положення 4: а) зверху антикрила; б) знизу антикрила



а)



б)

Рисунок 4.8. Лінії течії для найбільш навантаженого положення 3: а) ізометричний вид спереду; б) вид збоку

4.7. Порівняння положень і вибір розрахункового кута

Найбільша притискна сила не завжди є найкращим варіантом, оскільки зі збільшенням кута встановлення може суттєво зрости аеродинамічний опір. Тому положення профілю оцінюється за сукупністю критеріїв: величина притискної

сили, сила опору, співвідношення E_a , стабільність розподілу тиску та відсутність явно вираженого відриву потоку.

Положення 1 має найвище значення $E_a = 5,037$, тобто забезпечує найкраще співвідношення між притисковою силою і опором. Однак абсолютне значення притискової сили становить лише 1192,4 Н, або приблизно 121,5 кгс. Це менше за цільовий рівень близько 180 кгс, тому положення 1 не приймається як основне робоче положення.

Положення 2 забезпечує найбільшу притискову силу $D_{пр} = 1779,9$ Н. Отримане значення практично відповідає цільовому рівню 180 кгс. Тому положення 2 приймається як розрахункове і найбільш обґрунтоване для подальшого аналізу навантажень на конструкцію антикрила.

Положення 3 та 4 не мають переваги порівняно з положенням 2. У положенні 3 притискова сила зменшується до 1453,2 Н, а в положенні 4 становить 1488,4 Н. При цьому сила опору у положенні 4 є найбільшою серед усіх варіантів – 484,4 Н. Отже, подальша зміна кута після положення 2 не забезпечує приросту притискової сили, але погіршує співвідношення між притиском та опором.

4.8. Визначення безрозмірних аеродинамічних коефіцієнтів

Для додаткового порівняння результатів доцільно визначити безрозмірні коефіцієнти притискової сили та опору. На відміну від сили у ньютонах, коефіцієнти дозволяють оцінювати ефективність геометрії незалежно від конкретної швидкості потоку та розміру моделі.

Розрахункова площа антикрила визначається як добуток ширини профілю на хорду:

$$S_{кр} = b \cdot c = 1,7 \cdot 0,4 = 0,68 \text{ м}^2 \quad (4.4)$$

де $S_{кр}$ – розрахункова площа антикрила, м^2 ;

b – ширина антикрила, м;

c – хорда профілю, м.

Динамічний тиск повітряного потоку визначається за формулою:

$$q_n = \frac{(\rho \cdot V^2)}{2} \quad (4.5)$$

де q_n – динамічний тиск, Па;

ρ – густина повітря, кг/м³;

V – швидкість потоку, м/с.

$$q_n = \frac{(1,225 \cdot 60^2)}{2} = 2205 \text{ Па}$$

Коефіцієнт притискної сили визначається за формулою (4.5):

$$C_{np} = \frac{D_{np}}{q_n \cdot S_{кр}} \quad (4.6)$$

Коефіцієнт сили опору визначається за формулою (4.6):

$$C_x = \frac{F_x}{q_n \cdot S_{кр}} \quad (4.7)$$

Для розрахункового положення 2 маємо:

$$C_{np} = \frac{1779,9}{2205 \cdot 0,68} = 1,187$$

$$C_x = \frac{464,7}{2205 \cdot 0,68} = 0,31$$

Таблиця 4.5. Безрозмірні коефіцієнти для положень регулювання

Положення	D_{np} , Н	F_x , Н	C_{np}	C_x
1	1192,4	236,7	0,795	0,158
2	1779,9	464,7	1,187	0,310
3	1453,2	409,6	0,969	0,273
4	1488,4	484,4	0,993	0,323

Значення $C_{np} = 1,187$ для положення 2 показує, що обрана геометрія профілю та прийняті розміри анти-крила забезпечують високий рівень притискної сили при

заданій швидкості 60 м/с. При цьому $C_x = 0,31$ характеризує додатковий аеродинамічний опір, що створює анти-крило у цьому положенні

4.9. Формування розрахункового навантаження на систему кріплення

Отримані у Flow Simulation сили використовуються для формування розрахункового навантаження на систему кріплення. Це навантаження є вихідним для скінченно-елементної перевірки міцності силових елементів (підрозділ 4.10) і потрібне для конструктивного обґрунтування стійок, кронштейнів, закладних елементів і болтових з'єднань.

Під час реального руху автомобіля навантаження на антикрило може змінюватися через нерівності траси, коливання кузова, зміну кута тангажу, турбулентний потік за кузовом, гальмування та розгін. Тому для розрахункового навантаження приймається коефіцієнт перевантаження $k = 2,5$.

$$D_{розр} = 1779,9 \cdot 2,5 = 4449,8 \text{ Н} \quad (4.8)$$

де $D_{розр}$ – розрахункова вертикальна сила, Н;

k – коефіцієнт перевантаження.

$$F_{хрозр} = 464,7 \cdot 2,5 = 1161,7 \text{ Н} \quad (4.9)$$

де $F_{хрозр}$ – розрахункова поздовжня сила опору, Н.

Результуюча розрахункова сила визначається як геометрична сума вертикальної та поздовжньої складових:

$$R_{розр} = \sqrt{D_{розр}^2 + F_{хрозр}^2} \quad (4.10)$$

$$R_{розр} = \sqrt{4449,8^2 + 1161,7^2} = 4598,9 \text{ Н}$$

У першому наближенні, можна розподілити між двома симетричними опорами антикрила. Тоді на одну опору припадає:

$$D_{он} = \frac{4449,8}{2} = 2224,9 \text{ Н} \quad (4.11)$$

$$F_{хон} = \frac{1161,7}{2} = 580,9 \text{ Н} \quad (4.12)$$

$$R_{on} = \frac{4598,9}{2} = 2299,5 H \quad (4.13)$$

Отримані значення можна використовувати як вихідні дані для перевірки болтових з'єднань, вибору товщини кронштейнів та оцінки достатності прийнятої схеми кріплення. У межах цього дипломного проєкту основне обґрунтування полягає в тому, що вибрані геометричні параметри антикрила забезпечують цільовий рівень притисної сили, а розрахункове навантаження на одну опору визначене з урахуванням запасу на динамічні режими руху.

4.10. Скінченно-елементна перевірка міцності силових елементів

Оскільки в даному розрахунку моделюється не вся система кріплення антикрила, а одна окрема деталь конструкції, прикладене навантаження приймається відповідно до реальної схеми роботи вузла. Загальне аеродинамічне навантаження від антикрила розподіляється між чотирма силовими стійками, тому для перевірки однієї деталі використовується одна четверта частина сумарного розрахункового зусилля.

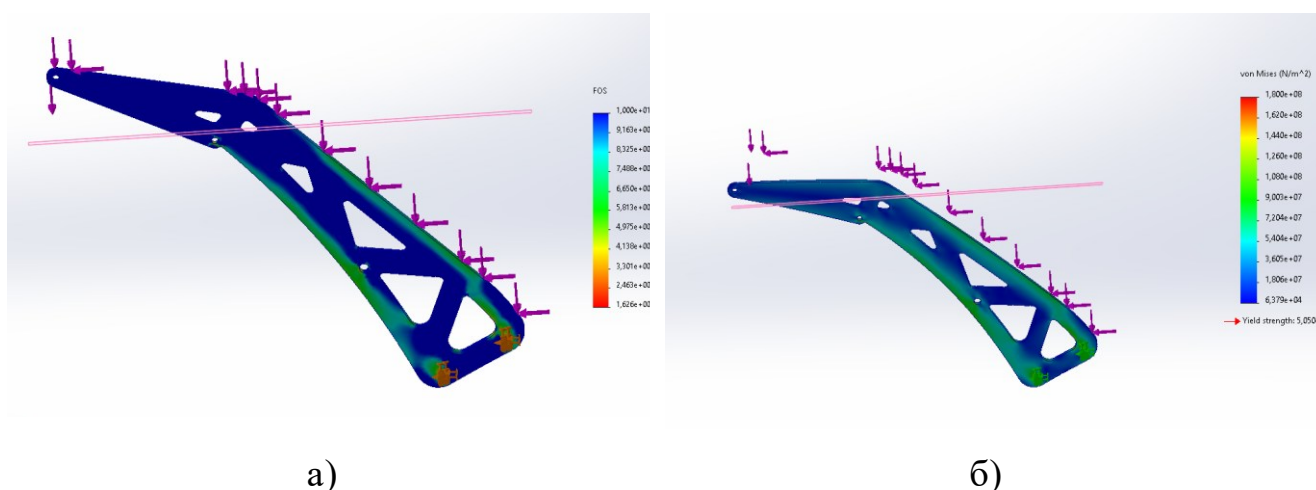


Рисунок 4.8. Проведений аналіз стійки swan-neck: а) критерій руйнування; б) розподіл напружень

Для стійки типу swan-neck виконано аналіз розподілу напружень і коефіцієнта запасу міцності. Найбільш навантажені ділянки розташовані біля

отворів кріплення та в місцях переходу між силовими перемичками. Це пояснюється тим, що саме через ці зони передається основне навантаження від профілю антикрила на систему кріплення. Мінімальний коефіцієнт запасу міцності для стійки swan-neck становить 1,6, що свідчить про працездатність деталі в межах прийнятої розрахункової схеми.

Але для того щоб сприймати більші навантаження, у подальшому доцільно переглянути конструкцію стійки, збільшити несучі перерізи в найбільш навантажених зонах або застосувати матеріал з вищими міцнісними характеристиками.

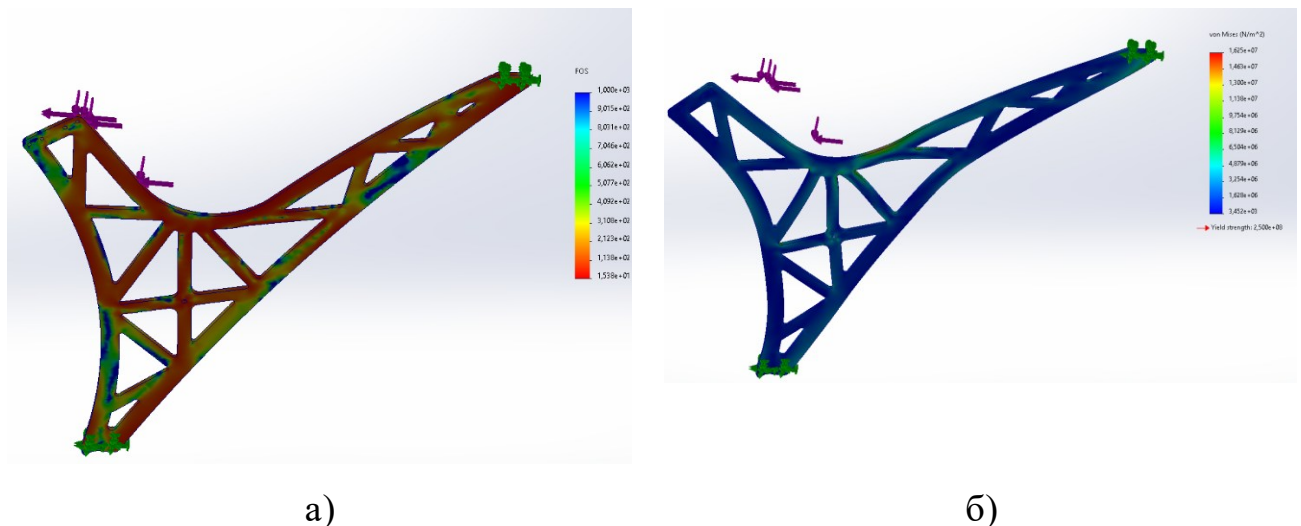


Рисунок 4.9. Проведений аналіз для основної стійки: а) критерій руйнування; б) розподіл напружень

Для основної стійки також виконано аналіз напружень і коефіцієнта запасу міцності. Найбільші напруження зосереджені біля болтових отворів, у кріпильних вузлах та місцях переходу між елементами конструкції. Мінімальний коефіцієнт запасу міцності становить 1,5, тому основна стійка має значний запас.

За результатами моделювання можна зробити висновок, що для основної стійки в подальшому доцільно розглянути спрощення матеріалу або додаткове полегшення конструкції. Найбільш відповідальною деталлю залишається стійка типу swan-neck, оскільки її запас міцності значно менший

4.11. Висновки до розділу 4

У розділі виконано аеродинамічне моделювання антикрила автомобіля в SolidWorks Flow Simulation. Розрахунок проведено для чотирьох положень регулювання кута встановлення профілю. Для кожного положення визначено вертикальну силу F_z , притискну силу $D_{пр}$, силу опору F_x та умовну аеродинамічну ефективність E_a .

За результатами порівняння встановлено, що найбільшу притискну силу забезпечує положення 2 з кутом встановлення $75,5^\circ$. У цьому положенні $D_{пр} = 1779,9$ Н, що відповідає приблизно 181,4 кгс. Отримане значення практично збігається з прийнятим цільовим рівнем 180 кгс, тому положення 2 прийнято як розрахункове.

Для вибраного положення визначено безрозмірні аеродинамічні коефіцієнти: $C_{пр} = 1,187$ та $C_x = 0,310$. Це підтверджує, що прийняті розміри антикрила – ширина 1700 мм і хорда 400 мм – забезпечують необхідний рівень притискної сили при швидкості 60 м/с.

З урахуванням коефіцієнта перевантаження $k = 2,5$ сформовано розрахункові навантаження на систему кріплення. Розрахункова вертикальна сила становить 4449,8 Н, розрахункова поздовжня сила – 1161,7 Н, а результуюча сила – 4598,9 Н. При симетричному розподілі між двома опорами на одну опору припадає приблизно 2299,5 Н результуючого навантаження.

Таким чином, у розділі обґрунтовано вибір робочого положення антикрила та підтверджено, що прийнята геометрія дозволяє досягти цільової притискної сили близько 180 кгс. На основі отриманих сил сформовано розрахункове навантаження на систему кріплення та виконано скінченно-елементну перевірку міцності силових елементів, результати якої підтверджують конструктивне обґрунтування кріплень, закладних елементів і болтових з'єднань.

5. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

5.1. Вихідні технологічні дані

Вихідними даними для розроблення технологічного процесу є геометрія антикрила, матеріали, попередньо прийняті в розділі 2, конструкція вузлів кріплення з розділу 3 та результати розрахункової перевірки. Технологічний процес потрібно узгодити з реальною конструкцією виробу: композитні деталі виготовляються окремо від металевих елементів, а в готовий вузол вони збираються вже на заключному етапі.

До складу виробу входять основний композитний профіль, торцеві пластини, металеві стійки і кронштейни, верхня поперечина, нижня зварна балка, розпірки та стандартні кріпильні елементи. Для кожної групи деталей приймається свій спосіб виготовлення, оскільки ці елементи мають різні матеріали, різну форму та різні вимоги до контролю.

Таблиця 5.1. Основні деталі антикрила та прийняті способи виготовлення

Група деталей	Матеріал / заготовка	Прийнятий спосіб виготовлення	Основний контроль
Основний профіль	CFRP-обшивки, Divinycell H80 або AIREX C70, закладні EN AW-6082-T6	Безматричне формування на пінному осерді з Mylar-плівкою та вакуумним ущільненням пакета	Геометрія профілю, поверхня, кромки, положення закладних
Торцеві пластини	3 шари CFRP + Soric XF 3 мм + 3 шари CFRP	Вакуумна інфузія плоскої сендвіч-панелі з подальшим фрезеруванням контуру	Площинність, контур, отвори, герметизація кромки
Основні металеві елементи	EN AW-6082-T6; для окремих незварних деталей можливий EN AW-7075-T651	Фрезерування, свердління, Zenкування, зачистка кромки	Розміри, отвори, радіуси переходів, якість поверхні

Продовження таблиці 5.1.

Нижня балка	EN AW-6082-T6, профіль/труба та фрезеровані елементи	Зварна збірка з TIG-зварюванням у кондукторі	Положення кронштейнів, геометрія, шви
Розпірки	Пултродована CFRP-труба, алюмінієві наконечники з різьбою M8	Розкрій труби, механічна обробка наконечників, вклеювання	Співвісність, якість вклеювання, різьба

5.2. Технологія виготовлення основного профілю антикрила

Основний профіль виготовляється на базі пінного осердя. Воно задає форму профілю та залишається всередині готової сендвіч-конструкції. Як матеріал осердя приймається AIREX C70 або Divinycell H80, тобто матеріали, які вже розглянуті в розділі вибору матеріалів.

Пінна заготовка розкрюється на окремі сегменти за довжиною профілю. Такий поділ спрощує обробку і дозволяє працювати з доступними розмірами плит. Кожен сегмент обробляється на верстаті з ЧПК за контуром S1223. Після чистової обробки сегменти склеюються в одну заготовку, а стики перевіряються і, за потреби, легко шліфуються.

У місцях кріплення профілю до кронштейнів в осерді виконуються посадкові ділянки під закладні елементи [16, 18]. Закладні виготовляються з EN AW-6082-T6. Перед вклеюванням їхні поверхні зачищаються, знежирюються та ізолюються від прямого контакту з CFRP шаром склотканини або іншим діелектричним прошарком. Це потрібно для передавання навантаження від болтів на жорсткішу частину профілю і для зменшення ризику гальванічної корозії.

Для попереднього визначення кількості вуглецевої тканини приймається площа профілю в плані 1700x400 мм. З урахуванням технологічних припусків на обрізання, перегин через кромки та фіксацію у вакуумному пакеті приймається припуск 50 мм по периметру. Тоді розмір заготовки одного шару становить 1800x500 мм.

Площа одного шару визначається за залежністю:

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_{ш} = L_{заг} \cdot B_{заг} = 1,8 \cdot 0,5 = 0,9 \text{ м}^2 \quad (5.1)$$

Для схеми з трьома шарами на верхній і трьома шарами на нижній обшивці сумарна площа вуглецевої тканини для основного профілю становить:

$$\sum S = 6 \cdot S_{ш} = 6 \cdot 0,9 = 5,4 \text{ м}^2 \quad (5.2)$$

З урахуванням технологічного запасу 10-15 % для підрізання, помилок розкрою та локальних підсилень доцільно прийняти орієнтовну потребу вуглецевої тканини для профілю 6-6,3 м². Це значення є попереднім і уточнюється після остаточного розкрою в САД або за шаблонами форми.

Тканина укладається на Mylar-плівку та просочується епоксидною смолою. Mylar виконує роль гнучкої формоутворювальної поверхні: після вакуумування він притискає ламінат до осердя і дає більш рівну зовнішню поверхню. Підготовлений пакет разом із плівкою обгортається навколо пінного осердя, після чого заготовка поміщається у вакуумний мішок [21].

Після герметизації створюється вакуум. Плівка і шари тканини притискаються до осердя, а надлишок смоли частково відводиться через допоміжні матеріали. Вакуум підтримується до завершення первинного твердіння смоли. Конкретний режим полімеризації приймається за рекомендаціями виробника епоксидної системи. Для системи SR1710/SD8822, попередньо відпрацьованої в розрахунково-графічних роботах, зручним є повільний затверджувач, оскільки він дає достатній час на підготовку великого пакета.

Після повного затвердіння, профіль виймають із мішка, знімають Mylar-плівку, обрізають технологічні припуски, зачищають кромки та свердлять отвори в зонах закладних елементів. Отвори виконуються після перевірки фактичного положення закладних, щоб не порушити силовий шлях кріплення.

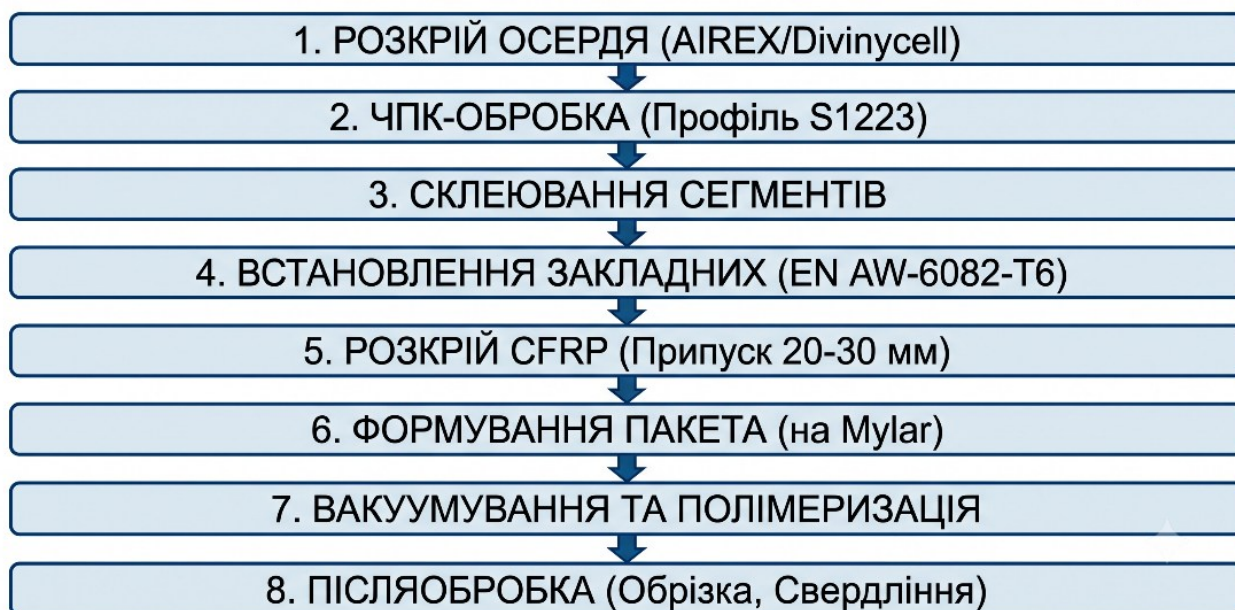


Рисунок 5.1. Маршрут виготовлення основного профілю

5.3 Технологія виготовлення торцевих пластин

Торцеві пластини мають плоску форму, тому їх простіше виготовляти не окремо в складній формі, а як одну плоску сендвіч-панель із подальшим фрезеруванням контуру. Для цього використовується вакуумна інфузія на рівній плиті [22].

Прийнята структура ендплейта: три шари вуглецевої тканини, Soric XF товщиною 3 мм і три шари вуглецевої тканини з другого боку [19, 34]. Для ендплейтів антикрила приймається товщина Soric XF 3 мм, оскільки пластина досить великі габарити і повинна краще працювати на згин.

Перед укладанням матеріалів робоча поверхня плити очищується, знежирюється та покривається розділювальним складом. Далі укладаються нижні шари вуглецевої тканини, Soric XF і верхні шари тканини. Для фіксації сухих шарів допускається використання аерозольного клею в мінімальній кількості, щоб не погіршити проходження смоли.

Після формування сухого пакета укладаються допоміжні матеріали: peel ply, перфорована розділова плівка, інфузійна сітка, спіраль подачі смоли, вакуумна магістраль і вакуумна плівка. У власній розрахунково-графічній роботі по

композитних матеріалах для подібного процесу використовувалися VB160 Vacuum Bagging Film, PP180 Peel Ply, R120 Perforated Release Film, FM100 Resin Infusion Mesh, герметизуюча стрічка, спіральні трубки, шланги, з'єднувачі та смолотримувач. У цьому дипломному проєкті ці матеріали можна прийняти як аналогічний комплект, а детально описати його в розділі 6.

Перед подачею смоли проводиться перевірка герметичності мішка. Така перевірка потрібна для того, щоб уникнути підсосу повітря і сухих ділянок у панелі. Після цього відкривається магістраль подачі смоли, і смола проходить через сухий пакет під дією різниці тисків. Після заповнення пакета подача перекривається, а вакуум підтримується до завершення первинного твердіння.

Після полімеризації панель знімається з плити, обрізається з технологічним запасом і фрезерується за контуром ендплейтів. Потім свердляться отвори під болти М5. Відкриті кромки, де видно Soric XF, потрібно герметизувати епоксидною смолою або компаундом, щоб не допустити потрапляння вологи та локального розшарування.

5.4. Виготовлення металевих елементів кріплення

Металеві елементи кріплення виготовляються переважно механічною обробкою. Такий спосіб найбільш зручний для одиничного виробу, оскільки дозволяє отримати потрібні отвори, монтажні площини та локальні переходи без виготовлення спеціального штампового або ливарного оснащення.

Основні стійки, фіксуючі пластини, кронштейни та верхня поперечина виконуються з EN AW-6082-T6. Заготовками для них є плитний, листовий або профільний прокат. Маршрут обробки включає розкрій заготовки, базування, чорнове і чистове фрезерування, свердління, зенкування, зняття фасок і контроль розмірів. У місцях болтових з'єднань потрібно уникати гострих внутрішніх кутів, тому переходи виконуються з радіусами.

Сійки типу swan-neck допускається виготовляти з EN AW-7075-T651, якщо за результатами розрахунку потрібна вища міцність. У такому випадку деталь

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повинна залишатися фрезерованою і незварною. Для деталей із цього сплаву бажано передбачити захисне покриття, оскільки він гірше переносить корозійний вплив, ніж EN AW-6082-T6.

Верхня поперечина виконується з EN AW-6082-T6 механічною обробкою з профільної або плитної заготовки. Основні операції: відрізання заготовки, фрезерування монтажних площин, свердління отворів, зенкування або розточування посадкових зон і контроль положення отворів. Цей елемент не розглядається як зварна збірка.

Нижня балка виконується як зварна збірка з EN AW-6082-T6. Центральну частину доцільно виготовляти зі стандартного профілю або труби, а кінцеві фланцеві елементи та опорні кронштейни – фрезеруванням із заготовки. Після припасування деталі встановлюються у зварювальний кондуктор і з'єднуються TIG-зварюванням у середовищі аргону.

Для EN AW-6082-T6 після зварювання потрібно враховувати ослаблення матеріалу в зоні термічного впливу. Тому для нижньої балки бажано передбачати достатню довжину швів, опорні площадки або косинки. EN AW-7075-T651 для цього вузла не застосовується, оскільки він не підходить для зварних конструкцій.

Розпірки виготовляються з готової пултрудованої CFRP-труби діаметром 16 мм. На кінцях встановлюються алюмінієві наконечники з різьбою M8. Перед вклеюванням поверхні труби та наконечників матуються, очищуються і знежирюються. Вклеювання виконується структурним епоксидним клеєм із контролем співвісності наконечників.

Таблиця 5.2. Режими та час руху для основних груп робіт

Група робіт	Основне обладнання	Припуски / режими	Операційний час
ЧПК-обробка пінного осердя	Фрезерний верстат з ЧПК	Припуск 1-2 мм на чистову обробку; режими уточнюються за щільністю піни	За керуючою програмою ЧПК

Продовження таблиці 5.2.

Інфузія ендплейтів	Плоска плита, вакуумний комплект	Припуск по контуру 20-30 мм; вакуум перед інфузією перевіряється drop-test	Час укладання + час проходження смоли + полімеризація
Фрезерування стійок і пластин	Верстат з ЧПК	Припуск 1-3 мм на контур; фаски після обробки	За довжиною траєкторії інструменту
Зварювання нижньої балки	TIG-зварювання, кондуктор	Припуск на припасування фланців; контроль деформацій після швів	Час прихоплення, основних швів і контролю
Складання антикрила	Складальний стенд, ручний інструмент	Без технологічного припуску; контроль моменту затягування	Час виставлення, затягування і перевірки

5.5. Загальне складання та контроль якості

Складання антикрила виконується після завершення виготовлення композитних і металевих деталей. Перед складанням перевіряються кромки, отвори, стан поверхонь і відповідність деталей CAD-моделі. Особливу увагу потрібно приділити зонам закладних елементів у профілі, оскільки саме через них навантаження переходить від профілю до кронштейнів.

На першому етапі до профілю встановлюються опорні кронштейни та елементи регулювання кута. Далі монтуються стійки типу swan-neck, основні стійки, фіксуючі пластини, верхня поперечина та нижня балка. Після цього встановлюються торцеві пластини й розпірки. Усі основні з'єднання виконуються стандартними метричними болтами класів міцності 8.8 або 10.9.

Затягування болтів виконується після попереднього виставлення конструкції. Спочатку деталі наживляються без повного затягування, щоб залишити можливість вирівнювання. Після перевірки симетрії, положення профілю та кута встановлення болтові з'єднання затягуються з контрольованим моментом.

Контроль якості включає перевірку геометрії та симетрії, стану поверхні CFRP-деталей, герметизації відкритих кромek, положення отворів, якості зварних швів нижньої балки та відповідності складеного вузла CAD-моделі. Для нижньої балки основними є візуальний контроль швів, перевірка геометрії після зварювання і, за потреби, капілярний контроль. За потреби для відповідальних композитних деталей застосовують методи неруйнівного контролю [40].

5.6. Висновки до розділу 5

У розділі визначено технологію виготовлення основних деталей антикрила. Основний профіль прийнято виготовляти за безматричною схемою на пінному осерді з використанням Mylar-плівки та вакуумного ущільнення пакета. Торцеві пластини виготовляються як плоскі сендвіч-панелі методом вакуумної інфузії.

Металеві елементи кріплення виготовляються переважно механічною обробкою з EN AW-6082-T6. Нижня балка виконується як зварна збірка з урахуванням зниження міцності матеріалу в зоні термічного впливу. Прийняті технологічні рішення відповідають одиничному характеру виготовлення та забезпечують практичну можливість реалізації конструкції.

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. ТЕХНОЛОГІЧНА ОСНАСТКА ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ АНТИКРИЛА

6.1. Вихідні дані та призначення оснащення

Технологічна оснастка призначена для забезпечення заданої геометрії антикрила, стабільного формування композитних поверхонь, правильного положення закладних елементів, точного виготовлення металевих вузлів та складання конструкції без перекосів. Оскільки виріб є одиничним або малосерійним, оснащення повинно бути достатньо точним, але не надмірно складним і дорогим.

До складу виробу входять різні за технологією виготовлення елементи: основний композитний профіль, торцеві пластини, металеві стійки та кронштейни, верхня поперечина, нижня зварна балка і розпірки. Тому оснащення поділяється на кілька груп: оснащення для формування композитів, оснащення для механічної обробки і свердління, зварювальний кондуктор, складальний стенд та прості контрольні шаблони.

Таблиця 6.1. Основні групи технологічного оснащення

Група оснащення	Основні елементи	Призначення
Формування основного профілю	Пінне осердя, Mylar-плівка, вакуумний мішок, шаблони для осердя і закладних	Форма S1223 та ущільнення CFRP-пакета
Інфузія торцевих пластин	Плоска плита, вакуумний насос, смолотовловлювач, плівка, peel ply, сітка, магістралі	Формування панелі CFRP + Soric XF + CFRP
Механічна обробка	Фрезерні пристрої, свердлильні шаблони, базові упори	Контури, отвори і монтажні площини
Зварювання нижньої балки	Зварювальний кондуктор	Фіксація деталей під час TIG-зварювання
Складання	Складальний стенд або базова плита з упорами	Виставлення вузлів у проектному положенні
Контроль	Шаблони профілю, кутомір, штангенінструмент, контрольні оправки	Перевірка геометрії, отворів і симетрії

6.2. Оснащення для формування основного профілю

Основний профіль виготовляється за безматричною схемою, тому головним формоутворювальним елементом є пінне осердя. Його форма задається під час ЧПК-обробки за контуром профілю S1223. Для контролю цієї операції доцільно використовувати прості поперечні шаблони профілю, які прикладаються до осердя після обробки. Такі шаблони можна виготовити з фанери, пластику, листового алюмінію або надрукувати на 3D-принтері.

Осердя профілю складається з окремих сегментів. Для їх склеювання потрібна рівна базова плита або простий пристрій з упорами, який не дозволяє сегментам зміщуватися відносно один одного. На цьому етапі важливо отримати рівну лінію стику без сходинок, оскільки всі нерівності осердя можуть перейти на зовнішню поверхню профілю.

Для встановлення закладних елементів потрібні локальні шаблони або кондуктори, які задають положення вставок відносно торців і осі профілю. Вони потрібні для того, щоб отвори в профілі після твердіння збігалися з кронштейнами. Самі закладні перед встановленням зачищаються, знежирюються та ізолюються від вуглетканини шаром склотканини або іншим діелектричним прошарком.

Зовнішня поверхня профілю формується через Mylar-плівку. Для роботи потрібно підготувати розгортки плівки з припуском по передній і задній кромці та по торцях. Mylar має бути чистим, без подряпин і складок, оскільки його стан безпосередньо впливає на якість зовнішньої поверхні профілю. Після укладання просоченої тканини на Mylar пакет обгортається навколо осердя і поміщається у вакуумний мішок.

Вакуумний мішок для основного профілю виконує функцію ущільнення пакета. Для цього використовуються вакуумна плівка, герметизуюча стрічка, шланги, фітинги, вакуумний насос і смолловловлювач. На відміну від ендплейтів, тут смола не проходить через сухий пакет у класичному інфузійному режимі: шари тканини попередньо просочуються смолою, а вакуум потрібен для ущільнення ламінату та притискання Mylar до осердя.

					ДПА Т2120.06.000.00 ПЗ	81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6.3. Оснащення для вакуумної інфузії торцевих пластин

Торцеві пластини мають плоску форму, тому для них достатньо рівної формувальної плити. Як робочу поверхню можна використати скляну, алюмінієву або іншу жорстку гладку плиту. Перед укладанням матеріалів поверхня очищується, знежирюється і покривається розділювальним складом. Для пористої або підготовленої поверхні оснащення доцільно застосовувати порозаповнювач або розділювальну систему типу Frekote FMS / Frewax.

Для інфузії ендплейтів використовується сухий пакет: три шари вуглецевої тканини, Soric XF товщиною 3 мм і три верхні шари вуглецевої тканини. Допоміжні матеріали підбираються так, щоб смола рівномірно пройшла через площу панелі й не залишила сухих зон. Для такого процесу використовуються типові матеріали: вакуумна плівка, peel ply, перфорована розділова плівка, інфузійна сітка, герметизуюча стрічка, спіральна трубка, вакуумні шланги, з'єднувачі та затискачі.

Для захисту вакуумного насоса встановлюється смолловловлювач. Це обов'язковий елемент інфузійної системи, оскільки під час проходження смоли її надлишок може потрапити у вакуумну магістраль. Перед початком інфузії виконується перевірка герметичності пакета. Практично це робиться як drop-test: після створення вакууму система перекривається, і протягом певного часу контролюється падіння вакууму. Якщо тиск швидко змінюється, місця підсосу потрібно знайти та повторно герметизувати.

Для ендплейтів не потрібно виготовляти окрему складну матрицю. Панель формується з технологічним запасом по контуру, а після полімеризації вирізається або фрезерується за CAD-моделлю. Такий підхід простіший і краще відповідає одиничному виготовленню.

					ДПА Т2120.06.000.00 ПЗ	82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

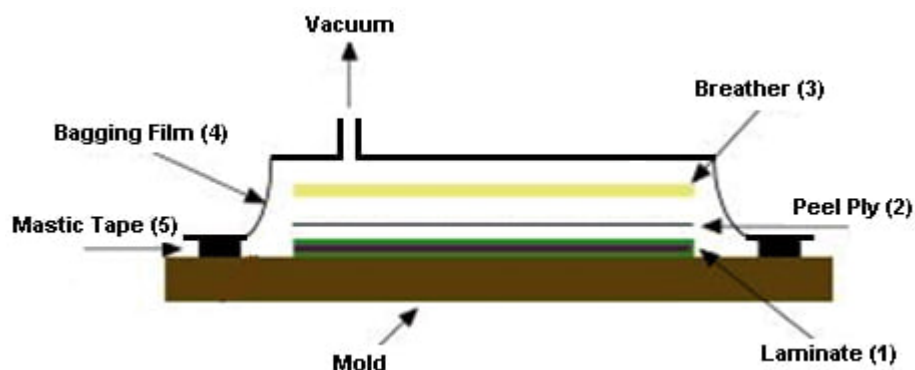


Рисунок 6.1. Типове оснащення для вакуумної інфузії

Таблиця 6.2. Допоміжні матеріали та оснащення для вакуумного процесу

Елемент	Призначення
Вакуумний насос	Створення вакууму під час інфузії або вакуумного ущільнення
Смоловловлювач	Захист насоса від потрапляння смоли
Вакуумна плівка	Формування герметичного мішка
Peel ply	Відокремлення допоміжних матеріалів і отримання придатної для склеювання поверхні
Перфорована розділова плівка	Відокремлення інфузійної сітки від ламінату
Інфузійна сітка	Розподіл смоли по площі панелі
Герметизуюча стрічка	Ущільнення периметра вакуумного мішка
Спиральна трубка, шланги, фітинги	Подача смоли та підключення вакуумної магістралі

6.4. Оснащення для механічної обробки та свердління

Після формування композитні деталі потребують механічної обробки. Для основного профілю це підрізання торців, зачистка кромek і свердління отворів у місцях закладних. Для ендплейтів основною операцією є фрезерування зовнішнього контуру та свердління отворів під кріплення. Щоб не пошкодити

ламінат, обробку бажано виконувати твердосплавним інструментом, із надійною фіксацією деталі та обов'язковим пиловидаленням.

Для свердління отворів у профілі та ендплейтах доцільно використовувати свердлильні шаблони. Вони зменшують ризик зміщення отворів і дозволяють повторити однакове положення кріплення на правій та лівій стороні. Якщо отвори виконуються за CAD-моделлю на ЧПК, шаблон можна використовувати як контрольний елемент після обробки.

Металеві деталі кріплення - основні стійки, стійки swan-neck, фіксуючі пластини, кронштейни та верхня поперечина - виготовляються з плитних або профільних заготовок. Для них потрібні базові пристрої для закріплення на столі верстата, а також контрольні оправки або штифти для перевірки співвісності отворів. Після фрезерування гострі кромки знімаються, а поверхні очищуються перед нанесенням захисного покриття.

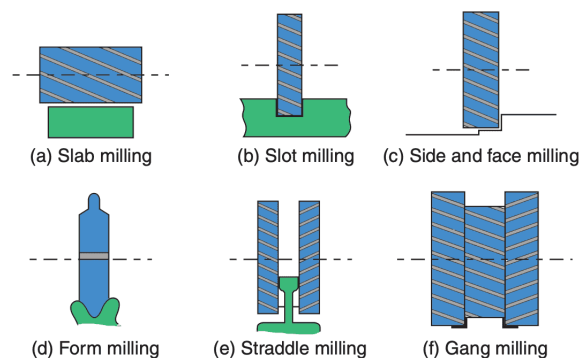


Рисунок 6.2. Основні схеми фрезерування

6.5. Зварювальний кондуктор для нижньої балки

Нижня балка виконується як зварна збірка з EN AW-6082-T6. До її складу входить центральна частина зі стандартного профілю або труби, кінцеві фланцеві елементи та опорні кронштейни. Для правильної геометрії такої збірки потрібен зварювальний кондуктор.

Кондуктор повинен фіксувати центральний профіль, кінцеві фланці та кронштейни в проектному положенні до виконання прихоплень і основних швів. Його доцільно виконати у вигляді жорсткої основи з базовими упорами,

притискачами та контрольними штифтами під отвори. Базування краще вести від отворів кріплення до кузова, оскільки саме вони визначають положення балки під час монтажу на автомобіль.

Під час зварювання алюмінієвого сплаву можливі місцеві деформації від нагріву, тому кондуктор повинен не тільки задавати положення деталей, а й обмежувати їх зміщення. Після зварювання балку знімають із кондуктора, очищують шви та перевіряють відстані між отворами, площинність фланців і симетрію опорних кронштейнів.

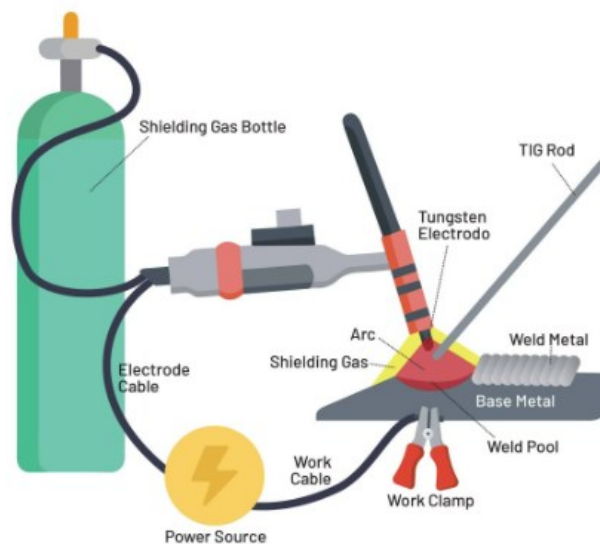


Рисунок 6.3. Схема процесу TIG-зварювання

6.6. Складальний стенд для антикрила

Після виготовлення окремих деталей потрібне контрольоване складання всієї системи. Для цього доцільно використовувати простий складальний стенд або базову плиту з упорами. Його призначення - виставити профіль, стійки, верхню поперечину, нижню балку, ендплейти та розпірки в положення, яке відповідає CAD-моделі.

Складальний стенд виконується у вигляді жорсткої базової плити з нанесеною центральною площиною симетрії, боковими упорами під основні стійки та стійки swan-neck і регульованими опорами під основний профіль. Базування

					ДПА Т2120.06.000.00 ПЗ	85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ведеться від отворів кріплення до кузова, оскільки саме вони визначають положення антикрила на автомобілі. Спочатку деталі встановлюються з неповним затягуванням болтів, після чого перевіряється симетрія, кут встановлення профілю та положення ендплейтів. Остаточне затягування виконується тільки після перевірки взаємного положення всіх елементів.

Для регульованого профілю бажано передбачити простий кутовий шаблон або цифровий кутомір. Це дозволяє перевірити, чи відповідають фіксовані положення кронштейнів заданому кроку регулювання.

6.7. Оснащення для контролю якості

Контроль якості не потребує складної вимірювальної системи, але повинен охоплювати всі відповідальні зони конструкції. Для композитного профілю перевіряють форму перерізу, стан поверхні, кромки, отвори та положення закладних. Для ендплейтів контролюють площинність, контур, розташування отворів і герметизацію відкритих кромок.

Для металевих деталей перевіряються розміри, співвісність отворів, якість кромки і стан захисного покриття. Для нижньої балки окремо контролюють зварні шви та геометрію після зварювання. Основним методом є візуальний і вимірювальний контроль; за потреби для швів можна застосувати капілярний контроль.

Таблиця 6.3. Оснащення для контролю якості

Об'єкт контролю	Оснащення	Що перевіряється
Основний профіль	Шаблони перерізу, лінійка, штангенциркуль, кутомір	Контур S1223, кромки, отвори, положення закладних
Ендплейти	Плоска плита, шаблон контуру, штангенциркуль	Площинність, контур, отвори M5, герметизація кромки
Металеві стійки та пластини	Штангенциркуль, контрольні штифти, різбові калібри	Отвори, фаски, кромки, монтажні площини

Продовження таблиці 6.3.

Нижня балка	Контрольна плита, рулетка/штангенінструмент, шаблон отворів	Геометрія після зварювання, шви, положення фланців
Зібране антикрило	Складальний стенд, цифровий кутомір, контрольна лінійка	Симетрія, кут встановлення, взаємне положення вузлів

6.8. Висновки до розділу 6

У розділі визначено комплект технологічної оснастки, необхідної для виготовлення та складання антикрила. Для основного профілю прийнято оснащення, пов'язане з обробкою пінного осердя, встановленням закладних, підготовкою Mylar-плівки та вакуумним ущільненням пакета. Для ендплейтів передбачено оснащення для вакуумної інфузії плоскої сендвіч-панелі.

Для металевих деталей потрібні пристрої для механічної обробки, свердлильні шаблони та контрольні оправки. Нижня балка виготовляється у зварювальному кондукторі, який забезпечує правильне положення фланців і кронштейнів під час TIG-зварювання. Для фінального складання доцільно використати складальний стенд, що дозволяє перевірити симетрію конструкції та кут встановлення профілю.

Запропонований комплект оснащення відповідає одиничному характеру виготовлення, не потребує складної серійної оснастки та узгоджується з технологічним процесом, прийнятим у розділі 5.

7. ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі розглянуто питання охорони праці під час виготовлення композитного антикрила автомобіля Mercedes-Benz A200 W176 та системи його кріплення. Об'єкт проектування поєднує полімерні композиційні матеріали, алюмінієві силові елементи, зварну нижню балку та болтове складання. Тому аналіз безпеки виконано не загально для виробництва, а за основними групами операцій, які реально передбачені технологічним процесом.

До складу робіт входять підготовка вуглецевої тканини, вакуумна інфузія з епоксидною системою, механічне оброблення затверділого CFRP, виготовлення алюмінієвих стійок і кронштейнів, зварювання алюмінієвої нижньої балки, складання антикрила болтовими з'єднаннями, контроль якості та поводження з відходами. Найбільш специфічними для цього виробу є ризики від епоксидної смоли та амінного затверджувача, респірабельного та електропровідного вуглецевого пилу, а також зварювального аерозолі.

7.1. Загальні положення та нормативна база

Правовою основою розділу є Закон України «Про охорону праці», який встановлює загальні вимоги до створення безпечних і нешкідливих умов праці, обов'язки роботодавця та права працівника на захист життя і здоров'я під час виконання робіт [41]. Для окремих виробничих процесів додатково використовуються нормативно-правові акти з охорони праці та стандарти системи безпеки праці.

Механічне оброблення алюмінієвих елементів, зокрема фрезерування, свердління, Zenкування, зачищення кромки і видалення задирок, належить до холодного оброблення металів і виконується з урахуванням вимог НПАОП 0.00-1.68-13 [42]. Зварювання нижньої алюмінієвої балки виконується відповідно до НПАОП 28.52-1.31-13, який встановлює вимоги до організації зварювальних робіт, робочих місць, вентиляції, електробезпеки та засобів індивідуального захисту [43]. Безпечна експлуатація вакуумного насоса, електроінструменту, верстатів і

					ДПАТ2120.06.000.00 ПЗ	88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зварювального обладнання забезпечується з урахуванням вимог НПАОП 40.1-1.21-98 [44].

Для класифікації небезпечних і шкідливих виробничих факторів використано ГОСТ 12.0.003 [45]. Вимоги до шкідливих речовин і повітря робочої зони розглядаються за ГОСТ 12.1.007-76 та ГОСТ 12.1.005-88 [46, 47]. Пожежна безпека аналізується з урахуванням ГОСТ 12.1.004-91 [48], а загальні вимоги до вентиляційних систем - за ГОСТ 12.4.021-75 [49]. Специфіку безпеки під час роботи з вуглепластиками, механічної обробки CFRP та утворення вуглецевого пилу додатково розглянуто за матеріалами NASA Carbon Structure Hazard Control, паспортами безпеки матеріалів і сучасними публікаціями щодо обробки CFRP [50-53].

7.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Під час виготовлення антикрила діють фізичні, хімічні та психофізіологічні чинники. Біологічні чинники для даного технологічного процесу не є характерними. Фізичні чинники виникають під час механічної обробки, зварювання, роботи електроінструменту, вакуумного обладнання та складання. Хімічні чинники пов'язані зі смолою, затверджувачем, розчинниками, зварювальним аерозолем і пилом композиту. Психофізіологічні чинники пов'язані з ручним монтажем великогабаритних деталей, роботою в обмежених положеннях і потребою точного складання.

Таблиця 7.1. Небезпечні та шкідливі фактори за етапами виготовлення

Етап робіт	Фактори	Можливі наслідки	Захист
Вакуумна інфузія	смола, аміни, пари	дерматит, подразнення	рукавички, окуляри, вентиляція
Розкрій тканини	волокна, гострий інструмент	подразнення, порізи	рукавички, чиста зона
Обробка CFRP	пил, мікрОВОлокна	ураження дихання	FFP3, HEPA, витяжка
CNC алюмінію	стружка, шум, рухомі вузли	травми, ураження очей	екрани, окуляри, щітки

Продовження таблиці 7.1.

Зварювання Al	аерозоль, УФ, ІЧ, бризки	опіки, фотокератит	маска, краги, витяжка
Складання	маса, кромки, момент затягування	травми рук, зминання вузлів	опори, рукавички, контроль моменту
Електрообладнання	струм, пробій, CFRP-пил	ураження струмом, КЗ	заземлення, ПЗВ, закриті шафи
Хімматеріали	пари, горючість	отруєння, пожежа	тара, маркування, вентиляція

З таблиці видно, що найнебезпечнішими специфічними етапами є робота з епоксидною системою, оброблення затверділого CFRP і зварювання алюмінію. Для цих операцій недостатньо лише загальних засобів індивідуального захисту. Необхідні місцева вентиляція, пиловідсмоктування, розділення чистих і забруднених зон, правильне зберігання хімічних матеріалів та контроль електробезпеки.

7.3. Безпека під час роботи з епоксидною системою та вакуумною інфузією

Композитний профіль і ендплейти виготовляються з використанням епоксидної інфузійної системи. Основну небезпеку становлять незатверділа смола, амінний затверджувач, можливі леткі компоненти та забруднення інструменту. Епоксидні системи можуть подразнювати шкіру й очі, а амінні затверджувачі є небезпечними через здатність викликати сенсibiliзацію при повторному контакті. Тому прямий контакт зі смолою не допускається.

Вакуумна інфузія має перевагу перед відкритим ручним ламінуванням, оскільки просочення відбувається в закритому пакеті під вакуумною плівкою. Це зменшує випаровування і прямий контакт працівника зі зв'язуючим. Однак на етапах дозування, змішування, підключення магістралей, контролю течії смоли та очищення залишків ризик контакту з хімічними речовинами зберігається.

Дозування і змішування компонентів виконують на окремому столі з хімічно стійким покриттям. Працівник використовує нітрилові рукавички, захисні окуляри

або щиток, закритий робочий одяг і за потреби респіратор з фільтром для органічних парів. Смолу та затверджувач зберігають у щільно закритій маркованій тарі, окремо від джерел тепла, відкритого полум'я і зони зварювання. Приймання їжі та куріння в зоні роботи зі смолою забороняється.

Під час підготовки вакуумного пакета необхідно контролювати герметичність магістралей і справність вакуумного насоса. Смоляна пастка обов'язкова, оскільки вона запобігає потраплянню смоли у насос. У разі розливу смоли забруднення прибирають одноразовими серветками, не допускаючи потрапляння рідких залишків у каналізацію. Залишки змішаної смоли після полімеризації збирають окремо від побутових відходів.

7.4. Безпека під час механічної обробки композитних деталей

Після полімеризації композитні деталі потребують обрізання кромek, свердління отворів і локального шліфування. Саме цей етап є найбільш небезпечним для органів дихання, оскільки під час різання і свердління вуглепластику утворюються дрібнодисперсний пил, короткі фрагменти волокон і частинки полімерної матриці. Дослідження механічної обробки вуглепластиків підтверджують утворення мікро- та нанорозмірних частинок, а також залежність пиловиділення від режимів різання [51-53].

Вуглецевий пил подразнює шкіру, слизові оболонки та органи дихання. Окремою небезпекою є електропровідність карбонового пилу. Його потрапляння в електрошафи, роз'єми, відкрите електрообладнання та блоки керування може спричинити коротке замикання. Тому ділянку оброблення композитів потрібно відокремити від відкритих електричних шаф і від зон чистого складання. Обрізання, свердління та шліфування вуглепластику виконують тільки з місцевим пиловідсмоктуванням. Для тонкого пилу доцільно застосовувати фільтри високого класу, зокрема HEPA-фільтрацію, що узгоджується з рекомендаціями щодо контролю вуглецевого пилу під час роботи з вуглепластиковими конструкціями

					ДПА Т2120.06.000.00 ПЗ	91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[50]. Працівник використовує протипиловий респіратор класу FFP3, захисні окуляри або щиток, рукавички та закритий робочий одяг.

Після обробки не допускається сухе підмітання або продування стисненим повітрям. Такі способи повторно піднімають пил у повітря. Прибирання виконують пилососом з відповідним фільтром і вологим протиранням поверхонь. Використані серветки, рукавички, фільтри та відходи вуглепластику збирають як забруднені вуглецевим пилом матеріали. Перед складанням відкриті кромки композиту герметизують, щоб зменшити пиління та поглинання вологи.

7.5. Безпека під час виготовлення алюмінієвих елементів

Металеві елементи кріплення антикрила (основні стійки, swan-neck конструкції, опорні кронштейни, перехідні пластини та кронштейни профілю) виготовляють з алюмінієвих сплавів шляхом контурного різання, фрезерування, свердління, зенкування та зняття задирок. Ці технологічні операції належать до холодного оброблення металів і повинні виконуватися відповідно до НПАОП 0.00-1.68-13 [42].

Основними небезпечними та шкідливими виробничими факторами під час механічної обробки є рухомі частини верстатів і різальний інструмент, відлітаюча стружка, гострі кромки деталей, шум, вібрація, а також ризик травмування під час базування та закріплення заготовок. Верстатне обладнання повинно бути оснащено справними захисними огороженнями або екранами. Під час роботи верстатник зобов'язаний використовувати засоби індивідуального захисту: захисні окуляри закритого типу, а під час виконання операцій із підвищеним рівнем шуму - засоби захисту органів слуху.

Видалення стружки з робочої зони безпосередньо руками категорично забороняється. Прибирання стружки здійснюють винятково після повної зупинки шпинделя за допомогою гачків, щіток або спеціальних пристроїв. Після механічної обробки всі деталі підлягають обов'язковому слюсарному зачищенню. Гострі кромки та задирки притупляють, оскільки вони становлять небезпеку травмування

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

персоналу та можуть спричинити пошкодження композитних елементів під час складання вузла.

Для забезпечення заданої точності складання координати отворів, фаски та зенкування виконують суворо за конструкторською документацією. Розвертання чи допрацювання отворів під болтові з'єднання вручну без належного контролю розмірів не допускається, оскільки перекіс осей може викликати монтажні напруження в композитному профілі та металевих стійках кріплення.

7.6. Безпека під час зварювання алюмінію

Нижня поперечна балка антикрила виконується як зварна алюмінієва конструкція. Прийнятим способом зварювання є аргонодугове зварювання неплавким вольфрамовим електродом змінним струмом у середовищі аргону. До основного профілю нижньої балки приварюються чотири опорні кріплення, через які навантаження від стійок передається на нижню частину силової системи.

Під час таких робіт діють зварювальний аерозоль, ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання, бризки розплавленого металу, підвищена температура, ризик опіків, пожежі та ураження електричним струмом. Вимоги до організації робіт під час зварювання металів встановлює НПАОП 28.52-1.31-13 [43].

Зварювання виконують у виділеній зоні, відокремленій від ділянки роботи зі смолою, вакуумною плівкою, розчинниками, розділювальними агентами та іншими горючими матеріалами. Робоче місце зварювальника захищають негорючими екранами або ширмами. Для стаціонарного поста застосовують загальнообмінну вентиляцію та місцеве відсмоктування зварювального аерозолю безпосередньо біля зони дуги. Забруднене повітря із зони зварювання не повинно повертатися в робочу зону без очищення [54].

Працівник повинен використовувати зварювальну маску зі світлофільтром, вогнестійкий спецодяг, краги, закрите захисне взуття і, за необхідності, респіраторний захист від зварювального аерозолю. Використання синтетичного

					ДПА Т2120.06.000.00 ПЗ	93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

одягу, який плавиться від бризок і теплового випромінювання, не допускається. Балони з аргоном зберігають у вертикальному положенні, закріпленими від падіння, подалі від джерел нагріву та механічних пошкоджень.

Перед початком робіт перевіряють справність кабелів, пальника, заземлення, редуктора, шлангів подавання аргону та вентиляції. Кріплення нижньої балки перед зварюванням фіксують у кондукторі, щоб зменшити ризик перекосу та температурного короблення. Спочатку виконують прихоплення всіх чотирьох кріплень, після чого перевіряють геометрію вузла. Основні шви виконують симетрично, з чергуванням сторін, щоб не допустити значного викривлення балки.

Після завершення зварювання контролюють відсутність тліючих матеріалів і перегрітих зон. Зварні шви після охолодження очищують і оглядають візуально. Механічну зачистку виконують із захистом очей і органів дихання. Після зварювання також перевіряють геометрію балки, положення кріплень і стан отворів; за потреби остаточне свердління або доробку отворів виконують після повного охолодження конструкції.

7.7. Вентиляція, електробезпека та пожежна безпека

Вентиляція є ключовим технічним заходом для трьох груп робіт: роботи зі смолою, обробки CFRP і зварювання. Загальні вимоги до вентиляційних систем визначаються ГОСТ 12.4.021-75 [49]. Місцеві відсмоктувачі повинні розташовуватися так, щоб забруднене повітря не проходило через зону дихання працівника. Роботу вентиляції необхідно контролювати за графіком, але не рідше одного разу на квартал, а вентиляційне обладнання має бути заземлене для зняття статичної електрики.

Електробезпека важлива для всіх етапів виробництва, оскільки використовуються вакуумний насос, електроінструмент, шліфувальне обладнання, верстати з ЧПК, освітлення та зварювальна установка. Захист забезпечують справною ізоляцією кабелів, захисним заземленням, пристроями захисного

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відключення, заборонаю роботи з пошкодженим інструментом і допуском до робіт працівників з відповідною групою з електробезпеки [44].

Під час обробки CFRP електрообладнання додатково захищають від потрапляння вуглецевого пилу. Електрошафи повинні бути закритими, а зона обробки композиту - обладнана пиловідсмоктуванням. Забороняється продувати деталі та робоче місце стисненим повітрям у напрямку електричних шаф, роз'ємів або відкритих контактів.

Пожежну небезпеку створюють епоксидна смола, затверджувач, розчинники, розділювальні агенти, вакуумна плівка, полімерне осердя, композитний пил і зварювальні роботи. Горючі матеріали зберігають у закритій тарі поза зоною зварювання. Під час зварювання горючі матеріали прибирають на безпечну відстань, а балони та інші вибухонебезпечні ємності розміщують окремо. Дільниці повинні бути оснащені вогнегасниками відповідного класу, а шляхи евакуації - вільними.

7.8. Засоби індивідуального захисту

Засоби індивідуального захисту добираються не загально для всього виробництва, а за конкретними небезпечними факторами. Під час роботи зі смолою основним є захист шкіри та очей, під час обробки CFRP - захист органів дихання, очей і шкіри від пилу, під час зварювання - захист від випромінювання, аерозолі, опіків і електричного струму.

Таблиця 7.2. Засоби індивідуального захисту за етапами робіт

Етап робіт	Основні ЗІЗ	Призначення
Смола і затверджувач	нітрилові рукавички, окуляри, респіратор А	захист шкіри, очей, дихання
Розкрій тканини	рукавички, окуляри	захист від волокон і порізів
Обробка CFRP	FFP3, окуляри, рукавички, спецодяг	захист від пилу

Продовження таблиці 7.2.

CNC алюмінію	окуляри, рукавички, навушники	стружка, шум
Зварювання Al	маска, краги, вогнестійкий одяг	УФ, бризки, тепло
Електроінструмент	окуляри, справний інструмент	механічні та електричні ризики
Складання	рукавички, окуляри	кромки, болтові вузли

Респіратор для органічних парів під час роботи зі смолою не замінює протипиловий респіратор під час обробки CFRP. Це різні види небезпеки, тому підбір фільтра виконується за фактором: органічні пари, пил або зварювальний аерозоль. Забруднені вуглецевим пилом ЗІЗ не переносять у чисту зону складання.

7.9. Поводження з хімічними матеріалами та відходами

Смоли, затверджувач, розчинники та розділювальні агенти зберігають у маркованій тарі з щільно закритими кришками. На робочому місці допускається тримати тільки кількість матеріалу, потрібну для поточної операції. Ємності не розміщують біля нагрівальних приладів, відкритого полум'я, зварювального поста або проходів.

Відходи поділяють на сухі відходи вуглецевої тканини, забруднені смолою матеріали, затверділі залишки епоксидної системи, пил CFRP, металеву стружку та використані засоби індивідуального захисту. Рідкі залишки смоли, затверджувача та розчинників не допускається зливати в каналізацію. Змішану епоксидну систему доцільно залишати до повного затвердіння у спеціальній тарі, після чого передавати на утилізацію відповідно до вимог підприємства.

Металева стружка від алюмінієвих деталей збирається окремо. Пил CFRP та матеріали, забруднені ним, збирають в окрему закриту тару, щоб запобігти повторному потраплянню частинок у повітря робочої зони. Робочі поверхні після операцій із композитом очищують пиłosосом з фільтром і вологим протиранням.

7.10. Висновки до розділу 7

У розділі проаналізовано небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які виникають під час виготовлення композитного антикрила та системи його кріплення. Встановлено, що основними ризиками є контакт із епоксидною смолою та аміним затверджувачем, утворення респірабельного й електропровідного пилу під час обробки CFRP, механічні небезпеки фрезерування та свердління алюмінію, а також комплекс факторів під час зварювання нижньої алюмінієвої балки.

Для зменшення ризиків запропоновано технічні та організаційні заходи: місцеву вентиляцію, пиловідсмоктування з фільтрацією, захист електрообладнання від вуглецевого пилу, застосування відповідних респіраторів, рукавичок і захисного одягу, безпечну організацію CNC-обробки, виділення зварювальної зони, правильне зберігання хімічних матеріалів і роздільне збирання відходів.

Запропоновані заходи відповідають загальним вимогам законодавства України з охорони праці, НПАОП для холодного оброблення та зварювання металів, правилам електробезпеки, стандартам системи безпеки праці щодо класифікації факторів, повітря робочої зони, пожежної безпеки, шкідливих речовин і вентиляції. Це дозволяє знизити виробничі ризики до прийняттого рівня під час одиничного виготовлення антикрила.

ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ

У дипломному проєкті розроблено конструкцію, технологію та технологічну оснастку виготовлення заднього антикрила для передньопривідного змагального автомобіля Mercedes-Benz A200 W176, підготовленого до участі у змаганнях формату Time Attack. Поставлену мету досягнуто: спроектовано антикрило, яке створює притискну силу близько 180 кгс на швидкості 60 м/с і кріпиться до силових елементів кузова за болтовою схемою без зварювання та вирізання конструктивних елементів автомобіля.

За результатами аналізу інформаційних джерел і регламентних вимог обґрунтовано конструктивну схему антикрила як окремого крилового профілю з торцевими пластинами та регульованим кутом установлення і верхнім кріпленням типу swan-neck. Проєкт прив'язано до найжорсткішого релевантного класу серії RTR (група Pro, клас R2) зі збереженням несучих елементів кузова, а як перспективний високонесучий профіль прийнято Selig S1223.

Обґрунтовано вибір матеріалів: для основного профілю прийнято сендвіч-конструкцію з вуглепластиковими обшивками та пінним осердям (AIREX C70 або Divinycell H80), для торцевих пластин - сендвіч-панель із застосуванням Lantor Soric XF, для металевих елементів кріплення - сплав EN AW-6082-T6, а для окремих високонавантажених незварних деталей - EN AW-7075-T651. У зонах болтових з'єднань передбачено закладні елементи та захист від гальванічної корозії.

Розроблено конструкцію антикрила та вузлів його кріплення на основі тривимірної моделі кузова. Для зменшення маси несучих стійок виконано топологічну оптимізацію в SolidWorks Simulation: масу основної стійки зменшено приблизно з 2,56 до 1,61 кг (близько 37 %), а стійки swan-neck - приблизно з 0,49 до 0,40 кг (близько 18 %) без необґрунтованого зниження жорсткості.

Виконано аеродинамічне моделювання в SolidWorks Flow Simulation для чотирьох положень регулювання. Розрахунковим прийнято положення з кутом установлення 75,5, у якому притискна сила становить 1779,9 Н (близько 181,4 кгс),

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

а безрозмірні коефіцієнти - $C_{пр} = 1,187$ та $C_x = 0,310$. З урахуванням коефіцієнта перевантаження $k = 2,5$ сформовано розрахункове навантаження на систему кріплення та виконано скінченно-елементну перевірку міцності силових елементів.

Розроблено технологію виготовлення композитних деталей: основний профіль формується за безматричною схемою на пінному осерді з використанням Mylar-плівки та вакуумного ущільнення пакета, а торцеві пластини виготовляються методом вакуумної інфузії. Металеві елементи кріплення виготовляються переважно механічною обробкою, а нижня балка - як зварна збірка з урахуванням зниження міцності сплаву в зоні термічного впливу.

Визначено комплект технологічної оснастки, що відповідає одиничному характеру виготовлення: пінне осердя, Mylar-плівка та вакуумний мішок для профілю; рівна плита й інфузійний комплект для ендплейтів; свердлильні шаблони та базові пристрої для механічної обробки; зварювальний кондуктор для нижньої балки; складальний стенд і прості контрольні шаблони.

Проаналізовано небезпечні та шкідливі виробничі фактори і запропоновано технічні й організаційні заходи з охорони праці під час роботи з епоксидними системами, обробки композитів, виготовлення та зварювання алюмінієвих елементів, що дозволяє знизити виробничі ризики до прийнятного рівня.

Практична значущість роботи полягає в можливості виготовлення та встановлення розробленого антикрила на реальний змагальний автомобіль, а запропонований підхід до проєктування й кріплення може бути використаний для подібних аеродинамічних елементів автомобілів цього класу.

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	99
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Katz J. Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. Cambridge, MA : Bentley Publishers, 1995. 270 p.
2. Milliken W. F., Milliken D. L. Race Car Vehicle Dynamics. Warrendale, PA : SAE International, 1995. 890 p.
3. Загальний регламент Всеукраїнської серії РТР Тайм Атак 2026 року / Автомобільна Федерація України. 2026. 54 с. URL: <https://www.rtrtimeattack.com.ua/reglament/> (дата звернення: 14.06.2026).
4. Технічні вимоги по класах Національної серії України РТР Тайм Атак 2026 року / Автомобільна Федерація України. 2026. 17 с. URL: <https://www.rtrtimeattack.com.ua/reglament/> (дата звернення: 14.06.2026).
5. Hucho W.-H. (ed.) Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering. 4th ed. Warrendale, PA : SAE International, 1998. 918 p.
6. Selig M. S., Guglielmo J. J. High-Lift Low Reynolds Number Airfoil Design. Journal of Aircraft. 1997. Vol. 34, No. 1. P. 72-79. DOI: 10.2514/2.2137.
7. Eftekhari H., Al-Obaidi A. S. M., Eftekhari S. The Effect of Spoiler Shape and Setting Angle on Racing Cars Aerodynamic Performance. Indonesian Journal of Science and Technology. 2020. Vol. 5, No. 1. P. 11-20. DOI: 10.17509/ijost.v5i1.22701.
8. Gopalarathnam A., Selig M. S., Hsu F. Design of High-Lift Airfoils for Low Aspect Ratio Wings with Endplates. 1997. DOI: 10.2514/6.1997-2232.
9. Soso M., Selig M. S. An Angle of Attack Correction Scheme for the Design of Low Aspect Ratio Wings with Endplates. 2002. DOI: 10.4271/2002-01-3292.
10. CSR Automotive. Rear spoiler / rear wing with ABE for Mercedes-Benz A-Class W176 AMG. URL: <https://csr-automotive.com/en/rear-spoiler-rear-wing-with-abe-for-mercedes-benz-a-class-w176-amg-hf132> (дата звернення: 14.06.2026).
11. Volkswagen Golf GTI TCR User Manual / Volkswagen Motorsport. 2019.
12. Volkswagen Golf GTI TCR / TCR Series. URL: <https://www.tcr-series.com/> (дата звернення: 14.06.2026).

					ДПАТ2120.06.000.00 ПЗ	100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

13. JUBU Performance. JUBU Carbon Swan Neck Rear Wing Sport 5-way adjustable. URL: https://www.jubu-performance.com/en/shop/part-jubu_carbon_swan_neck_heckfluegel_sport_5fach_einstellbar-2452 (дата звернення: 14.06.2026).

14. Mulsanne's Corner. Rear Wing LMP CFD 2009. URL: <https://www.mulsannescorner.com/rearwingLMPCFD2009.html> (дата звернення: 14.06.2026).

15. Renwar R. Design and Analysis of Wing Mounts for a Formula Student Race Car. 2019.

16. Camanho P. P., Matthews F. L. Stress Analysis and Strength Prediction of Mechanically Fastened Joints in FRP: A Review. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 1997. Vol. 28. P. 529-547. DOI: 10.1016/S1359-835X(97)00004-3.

17. Mara V., Haghani R., Al-Emrani M. Improving the Performance of Bolted Joints in Composite Structures Using Metal Inserts. Journal of Composite Materials. 2016. Vol. 50, No. 21. P. 3001-3018. DOI: 10.1177/0021998315615204.

18. Bunyawanichakul P., Castanié B., Barrau J.-J. Experimental and Numerical Analysis of Inserts in Sandwich Structures. Applied Composite Materials. 2005. Vol. 12. P. 177-191. DOI: 10.1007/s10443-005-1122-6.

19. Kausar A., Ahmad I., Rakha S. A., Eisa M. H. State-of-the-Art of Sandwich Composite Structures: Manufacturing-to-High Performance Applications. Journal of Composites Science. 2023. Vol. 7, No. 3. Article 102. DOI: 10.3390/jcs7030102.

20. Corum J. M., Battiste R. L., Ruggles-Wrenn M. B., Ren W., Etheridge J. M., McCoy H. E. Durability-Based Design Criteria for a Quasi-Isotropic Carbon-Fiber Automotive Composite. ORNL/TM-2002/39. Oak Ridge National Laboratory, 2002.

21. EasyComposites. Mouldless Carbon Fibre Aero Wing. URL: <https://www.easycomposites.co.uk/learning/mouldless-carbon-fibre-aero-wing> (дата звернення: 14.06.2026).

					ДПАТ2120.06.000.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		101

22. EasyComposites. Beginner's Guide to Carbon Fibre Resin Infusion. URL: <https://www.easycomposites.eu/learning/beginners-guide-to-carbon-fibre-resin-infusion> (дата звернення: 14.06.2026).

23. Udod O. O., Lavrinenkov A. D., Lytovchenko I. Advanced Composites in Small-Scale Automotive Production // Advances in Science and Technology : Proceedings of the II International Final R&D Online Conference of the II International Student Research Paper Competition, December 04, 2025. Kyiv : National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2025. Part II. P. 254-257.

24. US3455594A. Aerodynamic spoiler for automotive vehicles. URL: <https://patents.google.com/patent/US3455594A/en> (дата звернення: 14.06.2026).

25. WO1997032770A1. A car rear spoiler. URL: <https://patents.google.com/patent/WO1997032770A1/en> (дата звернення: 14.06.2026).

26. US8960770B2 / EP2631160B1. Rear spoiler with adjustable aerodynamic profiles. URL: <https://patents.google.com/patent/US8960770B2/en> (дата звернення: 14.06.2026).

27. WO2017123640A2. Vehicle rear wing with adaptive section and extendable flap. URL: <https://patents.google.com/patent/WO2017123640A2/en> (дата звернення: 14.06.2026).

28. Liu J., Huang Z., Li Z. et al. Galvanic Corrosion Protection of Al-Alloy in Contact with Carbon Fibre Reinforced Polymer through Plasma Electrolytic Oxidation Treatment. Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Article 3474. DOI: 10.1038/s41598-022-08727-7.

29. Shan M., Guo K., Gou G., Fu Z., Yang B., Lu W. Effect of Anodizing on Galvanic Corrosion Behavior of T300 CFRP/5083P-O Al Bolted Joints. Materials and Corrosion. 2020. Vol. 71. P. 409-418. DOI: 10.1002/maco.201911235.

30. Adapala P., Hosking N., Nichols M., Frankel G. Laboratory Accelerated Cyclic Corrosion Testing and On-Road Corrosion Testing of AA6××× Coupled to Carbon Fiber-Reinforced Plastics. Corrosion. 2022. Vol. 78, No. 7. P. 599-611.

					ДПАТ2120.06.000.00 ПЗ	102
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

31. AIREX C70 datasheet. Typical properties. Airex AG, 2026.
32. Divinycell H datasheet. DIAB Group, 2026.
33. ROHACELL 51 IG-F datasheet. Evonik Industries, 2026.
34. Lantor Soric XF datasheet. Lantor BV, 2026.
35. EN 755-2:2008. Aluminium and Aluminium Alloys - Extruded Rod/Bar, Tube and Profiles - Part 2: Mechanical Properties.
36. Reda Y., Abdel-Karim R., Elmahallawi I. Improvements in Mechanical and Stress Corrosion Cracking Properties in Al-Alloy 7075 via Retrogression and Reaging. Materials Science and Engineering: A. 2008. Vol. 485. P. 468-475.
37. DIN EN ISO 898-1:2009. Mechanical Properties of Fasteners Made of Carbon Steel and Alloy Steel - Part 1: Bolts, Screws and Studs with Specified Property Classes - Coarse Thread and Fine Pitch Thread.
38. Ashby M. F. Materials Selection in Mechanical Design. 5th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017.
39. Appendix J - Article 252. General Prescriptions for Cars in Groups N, A and R-GT / Fédération Internationale de l'Automobile, 2026. URL: <https://www.fia.com/regulation/category/123> (дата звернення: 14.06.2026).
40. Wang B., Zhong S., Lee T.-L., Fancey K. S., Mi J. Non-Destructive Testing and Evaluation of Composite Materials/Structures: A State-of-the-Art Review. Advances in Mechanical Engineering. 2020.
41. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12> (дата звернення: 15.06.2026).
42. НПАОП 0.00-1.68-13. Правила охорони праці під час холодного оброблення металів : затв. наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 16.10.2013 № 749.
43. НПАОП 28.52-1.31-13. Правила охорони праці під час зварювання металів : затв. наказом МНС України від 14.12.2012 № 1425.
44. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : затв. наказом Держнаглядохоронпраці від 09.01.1998 № 4.

					<i>ДПАТ2120.06.000.00 ПЗ</i>	103
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

45. ГОСТ 12.0.003-2015. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

46. ГОСТ 12.1.007-76. ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

47. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

48. ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

49. ГОСТ 12.4.021-75. ССБТ. Системы вентиляционные. Общие требования.

50. NASA. Carbon Structure Hazard Control : Reference Document WSTF-RD-1219-001-15. Johnson Space Center, White Sands Test Facility, 2015. 58 p.

51. Kehren D. et al. Release of Respirable Fibrous Dust from Carbon Fibers Due to Splitting along the Fiber Axis. Aerosol and Air Quality Research. 2019.

52. Kumoi J. et al. Assessment of occupational exposure to micro/nano particles generated from carbon fiber-reinforced plastic processing. 2024/2025.

53. Dvořáčková J. et al. Effect of Cutting Conditions on the Size of Dust Particles during CFRP Milling. Polymers. 2024.

54. HSE. Welding fume: protect your workers. Health and Safety Executive. URL: <https://www.hse.gov.uk/welding/protect-your-workers/index.htm> (дата звернення: 15.06.2026).

					ДП.АТ2120.06.000.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		104