

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

«Інженерне моделювання та оцінка ефективності каркасу безпеки легкового автомобіля»

Рівень вищої освіти перший бакалаврський
Галузь знань 27 Транспорт
Спеціальність 274 Автомобільний транспорт
Освітня програма Автомобільний транспорт

Шифр КвРАТ. 22085.01.06.00

Виконав студент 4 курсу група АТ-22-1



Підпис

Владислав ГОРБАТЮК

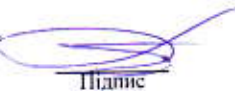
Керівник к.т.н., доцент каф. ТАМ



Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

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



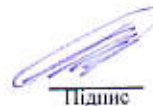
Підпис

Олег БАБАК

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ

10.06.2026 р.

Дата



Підпис

Олександр ДИХА

Хмельницький, 2026

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства
Рівень вищої освіти перший бакалаврський
Галузь знань 27 Транспорт
Спеціальність 274 Автомобільний транспорт
Освітня програма Автомобільний транспорт

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ


15.04 2026 р. Духа О.В.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Горбатюку Владиславу Володимировичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: **Інженерне моделювання та оцінка ефективності каркасу безпеки легкового автомобіля**

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

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

Затверджено наказом університету від 20.01.2026 р. № 7 (Д 26)

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

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

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

1) Аналіз конструкції та умов роботи несучих елементів кузова автомобіля.

2) Основні аспекти міцності та безпеки автомобілів.

3) Каркас безпеки спеціалізованих транспортних засобів.

4) Висновки, рекомендації.

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 15.04 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	<i>Аналіз конструкції та умов роботи несучих елементів кузова автомобіля</i>	28.05.2026	<i>вик</i>
2	<i>Основні аспекти міцності та безпеки автомобілів</i>	8.06.2026	<i>вик</i>
3	<i>Каркас безпеки спеціалізованих транспортних засобів.</i>	12.06.2026	<i>вик</i>
4	<i>Оформлення роботи, висновки.</i>	14.06.2026	<i>вик</i>
5	<i>Захист кваліфікаційної роботи</i>	16.06.2026	

Студент


Підпис

Владислав ГОРБАТЮК

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

«Инжен
легков
списку
сторін
59 сто
рисунок

автом
Встан
таких
випро
підви
яких з

засоби
висок
значн
підви
автом

визна
підтв
модел

авто
модел
комп
регла

ПЕР
МЕТ
МОД

РЕФЕРАТ

Судент групи АТ-22-1: Горбатюк В.В.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Ква. робота на тему «Інженерне моделювання та оцінка ефективності каркасу безпеки легкового автомобіля» складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 16 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 2 додатків розміщеного на 16 сторінках. Роботу викладено на 59 сторінці, з них 51 сторінки основного тексту, на яких розміщено 40 рисунків і 9 таблиць.

У роботі розглянуто особливості конструкції даху легкового автомобіля та проблеми його міцності при аваріях типу перекидання. Встановлено, що, незважаючи на значну частку смертельних випадків у таких ДТП, конструкція даху зазвичай не проходить обов'язкових випробувань на стійкість. Особливу увагу приділено транспортним засобам із підвищеним кліренсом, зокрема позашляховикам і спортивним моделям, у яких зміщення центру мас угору підвищує ризик перекидання.

Проаналізовано сучасні підходи до інженерного аналізу транспортних засобів. Показано, що застосування методу кінцевих елементів, високопродуктивних обчислювальних систем і концепції цифрових двійників значно розширює можливості дослідження складних технічних об'єктів, підвищує ефективність процесів проєктування, аналізу та сертифікації автомобілів.




За результатами проведеного аналізу встановлено, що похибки у визначенні жорсткості кузова для досліджених моделей є незначними, що підтверджує достатню точність і адекватність використаних методів моделювання несучих конструкцій.

Окремо розглянуто особливості конструкції каркасу безпеки автомобіля. Зазначено, що каркас проєктується індивідуально для кожної моделі транспортного засобу та, як правило, постачається у вигляді комплекту готових елементів із відповідною технічною документацією, яка регламентує порядок його складання та встановлення.

Ключові слова: КОНСТРУКЦІЯ ДАХУ, ЛЕГКОВИЙ АВТОМОБІЛЬ, ПЕРЕКИДАННЯ, КЛІРЕНС, КАРКАС БЕЗПЕКИ, ЖОРСТКІСТЬ КУЗОВА, МЕТОД КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК, МОДЕЛЮВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА УМОВ РОБОТИ НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ КУЗОВА АВТОМОБІЛЯ	7
1.1 Основні вимоги та класифікація кузовів.	7
1.2 Складові елементи кузова.	9
1.3 Кузовна жорсткість.	10
1.4 Кузовні матеріали.	13
2 ОСНОВНІ АСПЕКТИ МІЦНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ АВТОМОБІЛІВ	16
2.1 Пошкодження кузовів.	16
2.2 Системи перевірки кузовів на міцність.	19
2.3 Методи розрахунку.	22
2.4 Віртуальна оцінка характеристик.	24
2.5 Методи моделювання.	29
3 КАРКАС БЕЗПЕКИ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	39
3.1 Призначення та конструктивні особливості каркасів безпеки спеціалізованих транспортних засобів.	39
3.2 Елементи та матеріали каркасів.	43
3.3 Проектування каркасу.	47
3.3.1 Схеми компонування автомобіля.	47
3.3.2 Аналіз реакцій на колеса транспортного засобу.	50
3.3.3 Монтаж каркасу безпеки.	54
ВИСНОВКИ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57
ДОДАТКИ	59

КвРАТ. 22085.01.06.00									
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата	Інженерне моделювання та оцінка ефективності каркасу безпеки легкового автомобіля	Літера	Арквш	Арквшів	
Виконав		Горбатюк						4	59
Перевір.		Посонський							
Контр. Затвер.		Бабак Диха						ХНУ, АТ-22-1	

ВСТУП

Відомо, що витрати на виготовлення рамних конструкцій і кузовів автомобілів можуть становити до половини їх загальної вартості. Це обумовлено посиленням вимог нормативно-правової бази щодо безпеки транспортних засобів, необхідністю підвищення їх конкурентоспроможності, а також прагненням до зниження виробничих витрат. Кузов автомобіля виконує роль основної несучої структури, забезпечуючи сприйняття експлуатаційних навантажень (від пасажирів і вантажу) та захист водія і пасажирів у разі дорожньо-транспортних пригод.

Проектування несучих систем автомобілів є складним інженерним завданням, що потребує врахування великої кількості факторів, які часто мають суперечливий характер. Зокрема, необхідно одночасно забезпечити високу міцність і жорсткість конструкції при мінімальній масі.

Важливе значення у процесі розробки кузова або каркаса має оптимізація його конструкції із застосуванням сучасних підходів, серед яких особливе місце займає метод кінцевих елементів. Використання цього методу дозволяє проводити точні розрахунки напружено-деформованого стану конструкції та підвищувати ефективність інженерних рішень.

Для гоночних автомобілів питання оптимізації каркаса є особливо актуальним, оскільки навіть незначне зменшення маси конструкції може суттєво вплинути на динамічні характеристики та кінцевий результат змагань.

В умовах експлуатації гоночних автомобілів аварійні ситуації, включаючи перевертання, є досить поширеними. Тому особлива увага приділяється забезпеченню пасивної безпеки, зокрема міцності даху та стійок кузова. Випробування таких елементів передбачають прикладання навантаження до даху транспортного засобу з метою оцінки його здатності

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

витримувати силу, що значно перевищує власну масу автомобіля, без критичних деформацій.

Мета роботи полягає у розробці та аналізі несучої системи автомобіля шляхом моделювання каркасу кузова з використанням сучасних інженерних методів.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання:

1. Провести аналіз конструктивних особливостей та умов роботи кузовів автомобілів.

2. Розглянути існуючі методи і підходи до оцінювання міцності кузовів автомобілів.

3. Виконати аналіз жорсткості та міцності несучої системи за допомогою спрощених моделей і методів моделювання.

4. Розробити рекомендації щодо встановлення каркаса безпеки з метою підвищення рівня захисту автомобіля.

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА УМОВ РОБОТИ НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ КУЗОВА АВТОМОБІЛЯ

1.1 Основні вимоги та класифікація кузовів.

Кузов або рама є основним несучим елементом більшості колісних транспортних засобів і слугує базою для розміщення всіх агрегатів та вузлів автомобіля. Саме ця конструкція забезпечує сприйняття експлуатаційних навантажень і визначає загальні експлуатаційні характеристики транспортного засобу.

Каркасна конструкція найчастіше застосовується у гоночних автомобілях, автобусах і спеціалізованій техніці. Вона є однією з найбільш відповідальних і матеріаломістких частин автомобіля, оскільки від її параметрів залежать такі показники, як керованість, рівень безпеки, вантажопідйомність і довговічність.

У сучасному автомобілебудуванні поширені два основні типи несучих систем: рамна конструкція та несучий кузов, див. рис. 1.1. Несучий кузов об'єднує функції рами і зовнішньої оболонки в єдину структуру, яка підсилюється у зонах підвищених навантажень за допомогою поздовжніх (лонжеронів) і поперечних елементів. Такий підхід дозволяє зменшити масу автомобіля при збереженні необхідної міцності.

Водночас рамні конструкції і сьогодні використовуються у вантажних автомобілях, позашляховиках та окремих видах спеціальної техніки. Рама в даному випадку являє собою балочну систему, яка сприймає основні навантаження та забезпечує необхідну жорсткість конструкції [1].

До конструкції кузова або каркаса висувається комплекс вимог, які залежать від типу транспортного засобу:

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

- Для вантажних автомобілів: забезпечення необхідної несучої здатності; відповідність типу кузова (платформа, самоскид, цистерна тощо); оптимальні габаритні розміри; зручність і ергономічність кабіни водія.

- Для автобусів: забезпечення необхідної пасажиромісткості; раціональне компонування кузова; ефективна організація пасажирського та багажного простору.

- Для легкових автомобілів: високий рівень комфорту; відповідність класу автомобіля; зменшення маси конструкції.

Загальні вимоги: відповідність конструкції призначенню транспортного засобу; надійність і довговічність; мінімальна маса при достатній міцності та жорсткості; забезпечення пасивної безпеки; використання екологічно безпечних матеріалів.

Для гоночних автомобілів встановлюються додаткові спеціалізовані вимоги: відповідність технічним регламентам конкретної гоночної серії; максимальний рівень захисту пілота; мінімізація маси конструкції; обмеження щодо застосування матеріалів; технологічність виготовлення.



кузов на рамі



несучий кузов

Рисунок 1.1 – Кузов автомобіля

Сучасна класифікація несучих систем, рис. 1.2, враховує як їх конструктивні особливості, так і функціональне призначення. При цьому виділяють дві основні функції кузова або рами: несучу, яка забезпечує міцність і жорсткість, та естетичну, що формує зовнішній вигляд транспортного засобу.

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8



Рисунок 1.2 – Класифікації несучих систем автомобілів.

1.2 Складові елементи кузова.

Незважаючи на різноманітність типів кузовів і конструктивних рішень, більшість легкових автомобілів мають подібний набір основних елементів. До них належать:

- передні та задні лонжерони (1), рис. 1.3, що виконують роль силових балок і забезпечують загальну жорсткість;
- передній щит (2), який відокремлює моторний відсік від салону;
- передні стійки (3), що підтримують дах і підвищують міцність конструкції;
- дах (4);
- задні стійки (5);
- крила (6);
- панель багажного відділення (7);

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- середні стійки (8), які є важливими елементами забезпечення жорсткості;
- пороги (9);
- центральний тунель (10), у якому розміщуються елементи трансмісії та вихлопної системи, а також який виконує силову функцію;
- днище кузова (11);
- колісні ніші (12).

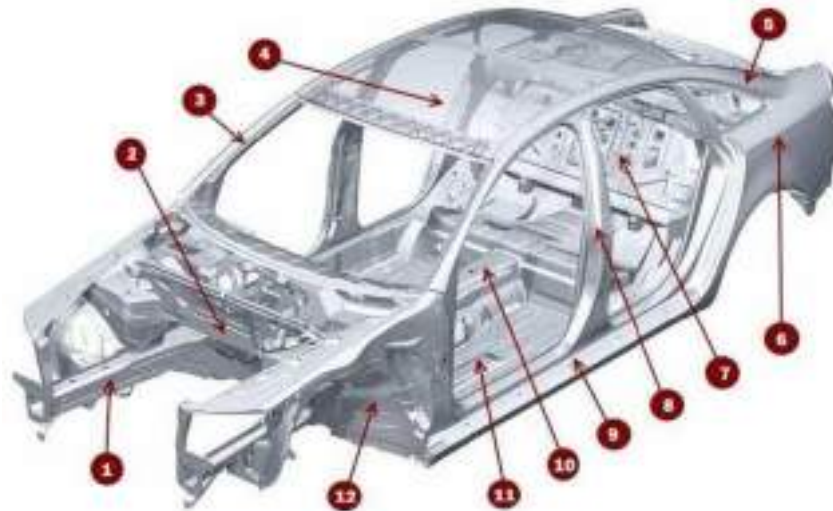


Рисунок 1.3 – Елементи кузова автомобіля

Конкретна конфігурація цих елементів може змінюватися залежно від типу кузова (седан, універсал, мінівен тощо), проте ключова роль завжди належить силовим елементам – лонжеронам, стійкам і порогам, які визначають міцність і жорсткість всієї конструкції.

1.3 Кузовна жорсткість.

Жорсткість кузова є однією з ключових характеристик несучої системи автомобіля і визначає його здатність протидіяти статичним та динамічним навантаженням під час експлуатації. Вона безпосередньо впливає на

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

керуваність транспортного засобу: чим вищий рівень жорсткості, тим стабільніша поведінка автомобіля на дорозі та точніша реакція на керування.

Рівень жорсткості залежить від низки конструктивних факторів, зокрема типу кузова, його геометричних параметрів, габаритів, кількості дверей, а також площі й розташування скляних елементів. Значний вплив мають способи кріплення лобового та заднього скла, які можуть підвищувати загальну жорсткість кузова на 20–40 %. Для додаткового підсилення конструкції застосовують спеціальні елементи – розпірки та підсилювачі.

Найбільшою жорсткістю, як правило, характеризуються кузови типу седан, купе та хетчбек [2]. Це пояснюється їх триоб'ємною компоновкою, що передбачає наявність додаткових силових перегородок між моторним відсіком, салоном і багажним відділенням. Водночас кузови типу універсал, мінівен або мікроавтобус зазвичай мають меншу жорсткість через особливості своєї конструкції та збільшений внутрішній об'єм.

Оцінювання жорсткості кузова здійснюється за двома основними показниками: жорсткістю на вигин і жорсткістю на кручення. Жорсткість на кручення визначає здатність конструкції протидіяти деформаціям при прикладанні протилежних сил відносно поздовжньої осі, наприклад, під час діагонального навантаження. У сучасних автомобілях із несучим кузовом необхідний рівень жорсткості досягається завдяки раціональному поєднанню лонжеронів, поперечних і поздовжніх балок.

Важливим елементом сучасних кузовів є зони програмованої деформації. Це спеціально спроектовані ділянки конструкції, які мають знижену жорсткість у визначених напрямках і виготовляються з матеріалів, що легше деформуються. До таких зон належать передня частина автомобіля та багажне відділення. У разі зіткнення вони деформуються за заздалегідь визначеним сценарієм, поглинаючи значну частину енергії удару.

Завдяки цьому зменшується рівень перевантажень, що передаються на пасажирський відсік, а також збільшується час гальмування під час удару, що

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

позитивно впливає на безпеку. Таким чином, енергія зіткнення частково розсіюється, знижуючи ризик травмування пасажирів.

Центральна частина кузова, де розташовані водій і пасажир, формує так звану «безпечну капсулу», рис. 1.4, або каркас безпеки. Вона виготовляється з високоміцних матеріалів і має підвищену жорсткість, що дозволяє мінімізувати деформації навіть при значних навантаженнях під час аварій. Це забезпечує збереження життєвого простору в салоні при фронтальних ударах або перекиданні автомобіля.



Рисунок 1.4 – Зони деформації та безпеки

Результати краш-тестів, рис. 1.5, демонструють ефективність такого підходу: деформаційні зони поглинають енергію удару, тоді як пасажирський відсік залишається відносно неушкодженим.



Рисунок 1.5 – Краш-тест VW Touran:

а – реальний; б – змодельований.

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

У транспортних засобах застарілих конструкцій, де відсутні такі рішення, деформації можуть поширюватися на весь кузов, що значно знижує рівень безпеки.

1.4 Кузовні матеріали.

Підвищення міцності та жорсткості кузова може досягатися шляхом збільшення товщини металу, однак це призводить до зростання маси автомобіля. Тому при проєктуванні несучих конструкцій особлива увага приділяється досягненню оптимального співвідношення між масою та міцнісними характеристиками. Одним із найбільш поширених матеріалів є низьковуглецева листовая сталь, яка поєднує достатню міцність і хорошу технологічність.

Окремі елементи кузова виготовляються методом штампування, після чого з'єднуються між собою, переважно, за допомогою точкового зварювання. Товщина сталевих листів для кузовних деталей зазвичай становить 0,8–2 мм, тоді як для рамних конструкцій застосовують метал товщиною 2–4 мм. Найбільш навантажені елементи, такі як лонжерони та стійки, виготовляють із більш товстої, часто легованої сталі (приблизно 4–8 мм, а для важких вантажних автомобілів – до 12 мм), рис. 1.6.

Перевагою низьковуглецевої сталі є її висока пластичність, що дозволяє отримувати деталі складної форми. Водночас цей матеріал має обмежену корозійну стійкість, тому для захисту застосовують оцинкування, легування (наприклад, додаванням міді) та нанесення лакофарбових покриттів.

Елементи, які не піддаються значним навантаженням, часто виготовляють із полімерних матеріалів або алюмінієвих сплавів. Це дозволяє зменшити загальну масу автомобіля та оптимізувати його вартість без суттєвого впливу на міцність конструкції.

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

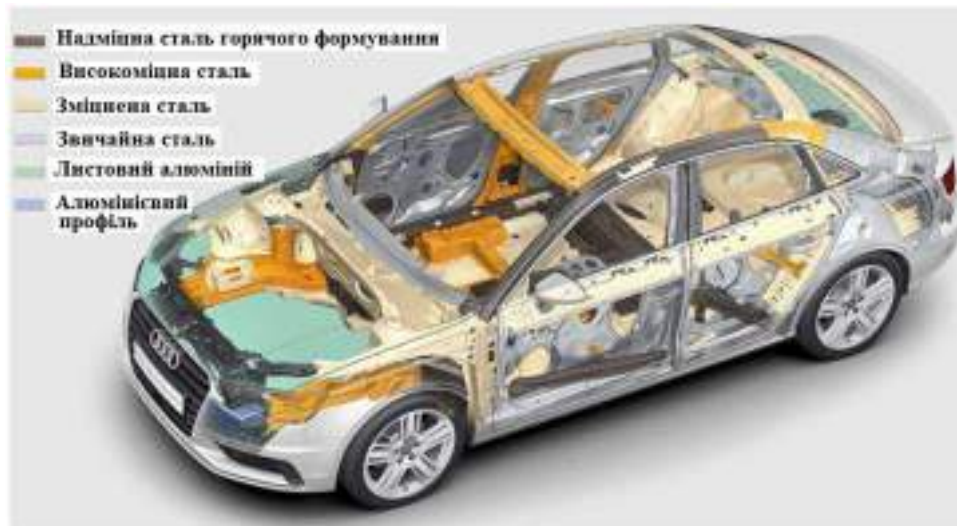


Рисунок 1.6 – Матеріали виготовлення кузова.

Сучасні тенденції автомобілебудування спрямовані на подальше зниження маси кузова при збереженні або підвищенні його жорсткості. Одним із перспективних матеріалів є алюміній, рис. 1.7, який відзначається малою густиною та достатньою міцністю. Особливу увагу привертає піноалюміній – матеріал із пористою структурою, що поєднує легкість, високу здатність до поглинання енергії удару, а також добрі тепло- і звукоізоляційні властивості. Основним його недоліком залишається висока вартість порівняно з традиційними матеріалами.

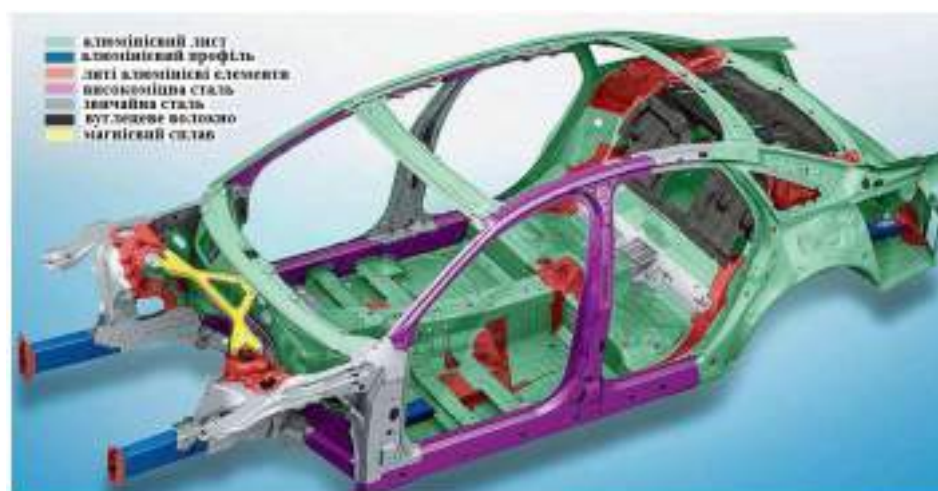


Рисунок 1.7 – Алюмінієвий кузов Audi A8

									КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
										14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Алюмінієві сплави активно використовуються провідними автовиробниками, зокрема компаніями Audi та Mercedes-Benz. Завдяки їх застосуванню вдається суттєво знизити масу кузова без втрати експлуатаційних характеристик. Наприклад, у моделі Audi A8 використання алюмінієвих конструкцій дозволило значно зменшити вагу кузова.

Загалом кузов є одним із найважливіших елементів автомобіля, що визначає його масу, керованість, довговічність і рівень безпеки. Вибір матеріалів і технологій їх обробки безпосередньо впливає на експлуатаційні характеристики транспортного засобу. Сучасні інженерні рішення орієнтовані на використання легких і міцних матеріалів, таких як алюмінієві сплави та композиційні матеріали, що дозволяє підвищити ефективність і безпеку автомобілів.

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ОСНОВНІ АСПЕКТИ МІЦНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ АВТОМОБІЛІВ

2.1 Пошкодження кузовів.

За статистичними даними, частка загиблих від травм, отриманих безпосередньо всередині автомобіля, становить приблизно 10–20 % від загальної кількості жертв дорожньо-транспортних пригод [4]. Основні типи аварій, що призводять до пошкодження кузова, можна поділити на чотири категорії:

- 1) фронтальні зіткнення;
- 2) бічні удари;
- 3) наїзди ззаду;
- 4) перекидання транспортного засобу, які можуть виникати як унаслідок зіткнень, так і через втрату стійкості автомобіля.

На сучасному етапі розвитку автомобілебудування значна увага приділяється розробці силової структури кузова, оскільки саме вона визначає рівень пасивної безпеки. При незначних фронтальних або задніх ударах основне навантаження сприймають спеціальні елементи – краш-бокси, які мають запрограмовану здатність до деформації, рис. 2.1. Вони стискаються, поглинаючи енергію удару та не передаючи її далі на жорсткі елементи кузова. У разі більш інтенсивних зіткнень навантаження розподіляється між усіма силовими компонентами конструкції, такими як лонжерони, підрамники та стійки даху, рис. 2.2. При цьому кузов повинен працювати як єдина система, ефективно розсіюючи енергію удару.

Найбільш високий рівень захисту забезпечується при фронтальних ударах, оскільки вони є найпоширенішими серед серйозних ДТП, а конструктивно передбачають можливість створення значних зон деформації спереду та ззаду автомобіля. Значно складніше забезпечити безпеку при бічних зіткненнях, адже відстань між джерелом удару та пасажиром є

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

мінімальною. Для підвищення захисту у дверях встановлюють підсилювальні балки, а центральні стійки та пороги проєктують таким чином, щоб енергія удару передавалася на силові елементи підлоги та даху.



Рисунок 2.1 – Розподіл енергії удару при прямому зіткненні.



Рисунок 2.2 – Розподіл енергії удару при бічному зіткненні.

Усі транспортні засоби в тій чи іншій мірі схильні до перекидання. Імовірність такого явища зростає зі збільшенням висоти центру мас, зменшенням ширини колії, підвищенням швидкості руху та чутливістю кермового управління. Для легкових автомобілів критичне поперечне прискорення, при якому можливе перекидання, зазвичай перевищує 1 g. Наприклад, модель Tesla Model S має низький ризик перекидання завдяки зниженому центру мас. Для легких вантажівок цей показник становить

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

приблизно 0,8–1,2 g, тоді як для великогабаритного комерційного транспорту він може бути значно нижчим – близько 0,2 g.

Ризик перекидання значно вищий у транспортних засобів із високим центром мас, таких як вантажні автомобілі, оскільки їх конструкція передбачає більшу висоту кузова та дорожній просвіт, рис. 2.3. Водночас, за умови відсутності викидання пасажирів із салону або додаткових зіткнень із перешкодами, рівень травматизму при перекиданні зазвичай нижчий, ніж при фронтальних або бічних ударах.



Рисунок 2.3 – Перекидання автомобіля

Дослідження, проведені організацією ADAC, свідчать про те, що навіть за сучасного рівня пасивної безпеки ризик травмування в автомобілях із відкритим верхом є вищим порівняно з транспортними засобами з жорстким дахом [4]. У зв'язку з цим рекомендується правильно регулювати положення сидінь (якнайнижче) та забезпечувати надійну фіксацію пасажирів ременями безпеки.

Ймовірність смертельних наслідків також залежить від маси та типу транспортного засобу. Менші автомобілі гірше поглинають енергію удару, що підвищує ризик тяжких травм. Водночас більші й важчі транспортні засоби, зокрема вантажівки, мають перевагу у зіткненнях за рахунок більшої маси. Однак спортивні автомобілі, попри високі швидкісні характеристики,

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

частіше потрапляють у серйозні аварії та мають підвищений ризик перекидання.

Перекидання становлять значну частку дорожньо-транспортних пригод із тяжкими наслідками. Для легкових автомобілів вони складають близько 15 % смертельних випадків, тоді як для більш габаритного транспорту цей показник може бути значно вищим. Найчастіше такі ситуації виникають при втраті керованості та різких маневрах повернення автомобіля на проїзну частину після з'їзду з дороги.

Механізм перекидання залежить від ряду факторів, зокрема швидкості руху, стану дорожнього покриття та розташування центру мас. Наприклад, на ґрунтових дорогах імовірність перекидання вища, ніж на асфальті. Транспортні засоби з низьким центром мас зазвичай зупиняються після контакту з поверхнею на даху, тоді як автомобілі з високим центром мас можуть здійснювати декілька обертів.

Аналіз місця дорожньо-транспортної пригоди та пошкоджень автомобіля дозволяє встановити основні параметри аварії, зокрема швидкість руху, кількість переворотів, напрямок руху та характер взаємодії з перешкодами. Це є важливим для реконструкції обставин події та підвищення рівня безпеки транспортних засобів у майбутньому.

2.2 Системи перевірки кузовів на міцність.

1) Система IHHS, перевірка міцності даху.

Американська організація Insurance Institute for Highway Safety (IHHS) проводить оцінювання не стійкості автомобіля до перекидання, а саме міцності даху, рис. 2.4. Такий підхід обумовлений тим, що недостатня жорсткість стійок даху при перевороті може призвести до деформації конструкції та контакту пасажирів із внутрішніми елементами кузова, що значно підвищує ризик травм голови та шиї. Крім того, при значних

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

деформаціях можливе руйнування скляних елементів і відкривання дверей, що створює небезпеку випадіння пасажирів із салону.

Методика випробувань відрізняється від традиційних краш-тестів [5]. Для оцінки використовується спеціалізований стенд, на якому до даху автомобіля прикладається зростаюче навантаження за допомогою преса. Випробування триває до моменту, коли деформація даху досягає 12 см, рис. 2.5.



Рисунок 2.4 – Слабкі стійки даху та пошкодження голови водія



Рисунок 2.5 – Стенд перевірки міцності даху

У процесі тестування визначається співвідношення прикладеної сили до маси автомобіля, що характеризує рівень міцності конструкції. Чим більше навантаження витримує дах без критичної деформації, тим вищою є оцінка. Зокрема:

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

- оцінка «добре» присвоюється при коефіцієнті не менше 4;
- «прийнятно» – близько 3,25;
- «нижче середнього» – приблизно 2,5;
- «погано» – менше 2,5.

Таким чином, дана методика дозволяє об'єктивно оцінити здатність даху забезпечувати захист пасажирів при перекиданні транспортного засобу.

2) Система VIA, перевірка міцності дверей та даху.

Система VIA призначена для комплексної перевірки міцності даху та дверей автомобіля відповідно до міжнародних стандартів, зокрема FMVSS 214 та 216. Вона забезпечує високу точність вимірювань і дозволяє отримувати детальну інформацію про поведінку конструкції під навантаженням.

Особливістю даної системи є універсальність: один випробувальний стенд, рис. 2.6, використовується як для дослідження міцності даху, так і для оцінки стійкості дверей до деформацій. Конструкція стенда передбачає можливість зміни кута прикладання навантаження, що дозволяє моделювати різні умови навантаження, у тому числі вертикальне зминання.



Рисунок 2.6 – Випробування міцності даху та дверей

До складу вимірювальної системи входять:

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- тривісні тензодатчики для визначення точки прикладання сили з високою точністю (похибка близько 0,5 % після обробки сигналу);
- магнітострикційні датчики для фіксації переміщень і деформацій.

Основні технічні характеристики системи включають:

- діапазон кута навантаження даху – 0–40°;
- можливість зміни кута штовхача в межах $\pm 20^\circ$;
- кут деформації дверей – до 90°;
- максимальний робочий хід – до 1 м;
- допустима висота автомобіля – до 2,1 м;
- граничне навантаження – до 250 кН.

Завдяки таким можливостям система ВІА дозволяє більш точно оцінювати міцнісні характеристики кузова та визначати його поведінку при різних видах навантажень.

2.3 Методи розрахунку.

Підвищення міцності та пасивної безпеки кузовних конструкцій при одночасному зменшенні матеріаломісткості є однією з ключових задач сучасного автомобілебудування. Її вирішення значною мірою залежить від удосконалення методів проектування, випробувань і сертифікації кузовів та кабін транспортних засобів.

Традиційно найбільш достовірним способом оцінки несучої здатності є експериментальні методи, що базуються на натурних випробуваннях повномасштабних конструкцій або транспортних засобів у цілому. Вони забезпечують високу точність результатів, однак потребують значних матеріальних витрат і часу, особливо при необхідності дослідження великої кількості варіантів конструкцій.

У зв'язку з цим дедалі більшого значення набувають розрахункові методи, які дозволяють аналізувати поведінку конструкцій на етапі

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

проектування. Вони базуються на створенні математичних моделей і дають можливість оцінювати міцність і безпеку без виготовлення великої кількості дослідних зразків.

Незалежно від обраного підходу, процес розрахункової оцінки включає кілька основних етапів [6]:

1. Аналіз конструкції та визначення її силової схеми.
2. Встановлення умов навантаження та закріплення.
3. Побудова розрахункової моделі, що включає:
 - формування геометрії та структури елементів;
 - задання властивостей матеріалів;
 - визначення граничних умов і навантажень;
 - перевірку та коригування моделі.
4. Виконання розрахунку за обраним методом.
5. Аналіз отриманих результатів.
6. Дослідження конструкції при різних режимах навантаження.
7. Узагальнення результатів і визначення характеристик деформації.
8. Остаточна оцінка міцності та безпеки конструкції.

На початковому етапі особлива увага приділяється аналізу функціонального призначення елементів конструкції, їх взаємодії та впливу на загальну міцність. Далі визначаються режими навантаження (вигин, кручення, ударні впливи) та умови їх прикладання.

Розрахункові моделі можуть мати різний рівень деталізації:

- спрощені (стрижневі моделі);
- комбіновані (стрижневі та пластинчасті елементи);
- детальні (переважно пластинчасті елементи з високим ступенем відповідності реальній конструкції).

Сучасні методи, зокрема метод кінцевих елементів, дозволяють отримувати розподіл напружень, деформацій та внутрішніх зусиль у конструкції. Для обробки результатів застосовуються спеціалізовані

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

програмні комплекси, а також допоміжні інструменти для візуалізації та аналізу даних.

Завершальний етап передбачає оцінку відповідності конструкції встановленим вимогам. У разі виявлення недоліків здійснюється коригування конструктивних рішень і повторення розрахункового циклу до досягнення оптимальних параметрів.

Таким чином, поєднання експериментальних і розрахункових методів забезпечує комплексний підхід до оцінки міцності та безпеки кузовних конструкцій сучасних автомобілів.

2.4 Віртуальна оцінка характеристик.

Сучасний розвиток цифрових технологій дозволив широко застосовувати концепцію цифрових двійників для аналізу характеристик несучих систем автомобілів. Цифровий двійник являє собою комп'ютерну модель, створену на основі математичного опису об'єкта, яка відтворює його ключові властивості, що цікавлять розробника або дослідника. Для отримання достовірних результатів такі моделі повинні бути забезпечені ефективними чисельними методами розрахунку.

Випробування у цьому випадку здійснюються не на фізичних зразках, а у спеціальному програмному середовищі – віртуальних стендах [7]. Якщо математичну модель доповнити алгоритмами, що дозволяють змінювати умови навантаження, параметри конструкції та проводити серію перевірок, формується повноцінний віртуальний випробувальний стенд. Сукупність таких стендів може утворювати цифрову платформу, яка використовується для проектування, тестування та сертифікації транспортних засобів.

Інтеграція алгоритмів оптимізації в цифровий двійник відкриває додаткові можливості для вдосконалення конструкцій. Зокрема, застосовуються методи топологічної оптимізації, оптимізації розміщення

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

підсилювальних елементів, а також підходи до зниження маси конструкції без втрати її міцності та жорсткості.

Цифровий двійник кузова, рис. 2.7, включає детальне відтворення його геометрії, конструктивних особливостей і властивостей матеріалів. Водночас для комплексного аналізу необхідно моделювати не лише кузов, а й інші системи автомобіля, такі як електрообладнання, гальмівна система та інші підсистеми. Це дозволяє враховувати взаємодію між елементами конструкції та оцінювати поведінку автомобіля в цілому.

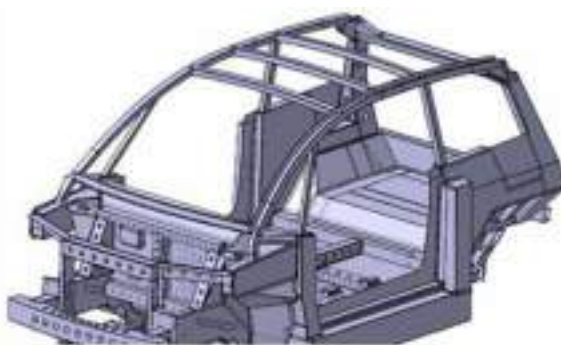


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд кузова автомобіля та його конструктивних елементів.

Повнота цифрового представлення є важливою умовою для реалізації комплексного підходу до проєктування. Наприклад, у середовищі цифрового двійника можна визначити оптимальне розташування акумуляторних батарей і оцінити їхню поведінку під час аварійних ситуацій, зокрема у краш-тестах, рис. 2.8.

Розробка таких моделей потребує створення складних математичних і комп'ютерних систем, здатних враховувати взаємодію різних елементів і процесів. Це дає змогу не лише оцінювати характеристики конструкції, а й оптимізувати її параметри в умовах заданих сценаріїв навантаження.

Цифрові двійники широко застосовуються для оцінки жорсткості та міцності кузова, рис. 2.9. Вони базуються на кінцево-елементних моделях, які

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сучасні програмні комплекси, що реалізують віртуальні випробувальні стенди, оснащені розвиненими засобами візуалізації, які дають змогу аналізувати результати моделювання у зручній графічній формі. Важливим напрямом розвитку є автоматизація процесів оцінювання та оптимізації конструкцій.

За допомогою віртуальних стендів можна моделювати різноманітні сценарії експлуатації та аварійних ситуацій, зокрема, рис. 2.10, 2.11:

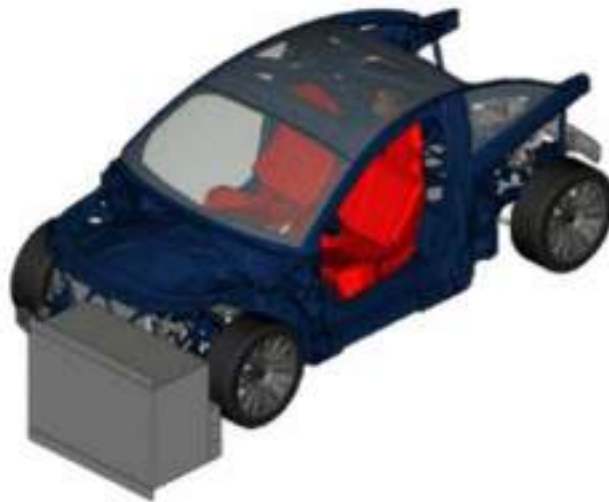


Рисунок 2.10 – Приклад візуалізації краш-тесту на віртуальному стенді.

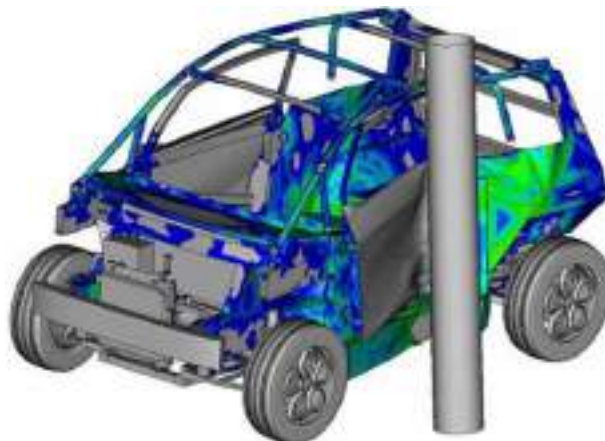


Рисунок 2.11 – Візуалізація результатів симуляції краш-тесту, де оцінюється бічний удар

- фронтальні та бічні зіткнення;

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

- удари ззаду;
- перевірку міцності даху при перекиданні;
- вплив навантажень на елементи кузова та внутрішні системи.

Особливу увагу приділяють аналізу безпеки електромобілів, де важливо оцінити поведінку акумуляторних батарей під час ударів, оскільки вони можуть становити додаткову небезпеку у разі пошкодження.

Окрім міцнісних характеристик, віртуальні стенди дозволяють досліджувати інші параметри, такі як:

- аеродинамічні властивості та забруднення поверхні кузова;
- акустичний комфорт у салоні;
- вплив підвіски на рівень шуму;
- ефективність дренажних систем.

Сучасні досягнення у сфері чисельного моделювання, зокрема методів кінцевих елементів і високопродуктивних обчислень, дозволили створювати складні цифрові моделі транспортних засобів. Це суттєво змінило підходи до проєктування, зробивши можливим повний цикл розробки продукції у цифровому середовищі.

Однією з ключових задач залишається забезпечення точності та стійкості математичних моделей, що використовуються для оцінки характеристик кузова. Сучасні системи вже дозволяють отримувати результати з високим рівнем достовірності, що підтверджується практикою їх застосування.

Подальший розвиток даного напрямку пов'язаний із впровадженням автоматизованих систем оптимізації, де параметри конструкції змінюються в заданих межах, а оптимальне рішення визначається на основі критеріїв ефективності, наприклад мінімізації маси або вартості при забезпеченні необхідного рівня міцності та безпеки.

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

2.5 Методи моделювання.

1) Модель поверхонь структурних.

«SSS» – метод структурних поверхонь був запропонований у 1969 році та зарекомендував себе як ефективний інструмент на початкових етапах проектування, особливо при аналізі концептуальних рішень або значних змін конструкції. Його сутність полягає у представленні кузова автомобіля у вигляді сукупності окремих плоских елементів.

Кожна така поверхня розглядається як умовно жорстка в межах власної площини та перебуває у рівновазі під дією системи сил. Ці сили формуються під впливом маси агрегатів і вузлів, закріплених на відповідних ділянках конструкції. Наприклад, навантаження від силового агрегату передається на поздовжні та поперечні елементи кузова.

Такий підхід дозволяє швидко оцінити розподіл навантажень і визначити ключові силові шляхи в конструкції, хоча він має обмежену точність через значні спрощення геометрії.

2) Балкова модель однієї сторони автомобіля «BMOS».

Модель BMOS є розвитком підходу SSSM і враховує більш складну геометрію конструкції. Основними відмінностями є:

- використання тривимірного представлення моделі;
- врахування додаткових елементів, зокрема панелі чверті кузова.

На відміну від попереднього методу, де складні поверхні спрощуються до балкових елементів, у даній моделі приділяється більша увага реальній геометрії, що дозволяє зменшити похибки розрахунків. Зокрема, більш коректно моделюються з'єднання між стійками та силовими елементами кузова.

Ця модель дає змогу точніше оцінити вплив окремих конструктивних компонентів і переходить від двовимірного до просторового аналізу.

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3) Балкова модель всього кузова автомобіля «ВМЕС».

У моделі ВМЕС вся конструкція кузова (Body in White) подається у вигляді системи балкових елементів, рис. 2.12. Основні силові компоненти – лонжерони, поперечини та центральний тунель – моделюються як тонкостінні балки прямокутного перерізу.

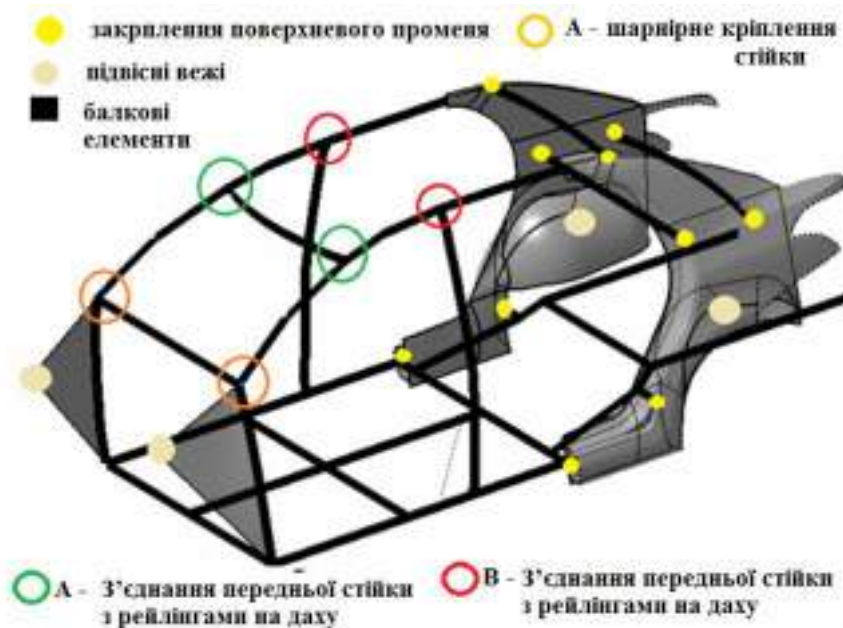


Рисунок 2.12 – Конфігурація з'єднань і геометрії моделі ВМЕС.

Особливу увагу приділено:

- впливу додаткових підсилювальних елементів;
- ролі бічних зв'язків;
- характеристикам з'єднань між окремими частинами конструкції.

У моделі використовуються шарнірні з'єднання з обмеженням ступенів вільності, за винятком можливості обертання навколо координатних осей. Це дозволяє врахувати реальну гнучкість конструкції та більш адекватно відобразити її поведінку під навантаженням.

Такий підхід забезпечує узагальнену, але достатньо інформативну оцінку жорсткості кузова в цілому.

4) Модель зв'язаної поверхні та балок «CBSM».

						КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
							30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Модель CBSM є більш досконалим варіантом, який поєднує використання балкових і поверхневих елементів. У цьому випадку досліджуються два ключові аспекти [10]:

- вплив більш детального представлення поверхонь порівняно зі спрощеними балковими моделями;
- особливості взаємодії між різними типами елементів у межах кінцево-елементної моделі.

Додатково в моделі враховуються складні з'єднання, наприклад між верхніми елементами кузова та опорними контурами, з урахуванням їх обмеженої рухливості. Для відтворення гнучкості таких з'єднань застосовуються умови, які дозволяють обертання відносно просторових осей.

Моделювання виконується із застосуванням сучасного програмного забезпечення, зокрема ABAQUS, рис. 2.13. Розрахунки проводяться у неявній постановці, що забезпечує стабільність чисельного розв'язання.

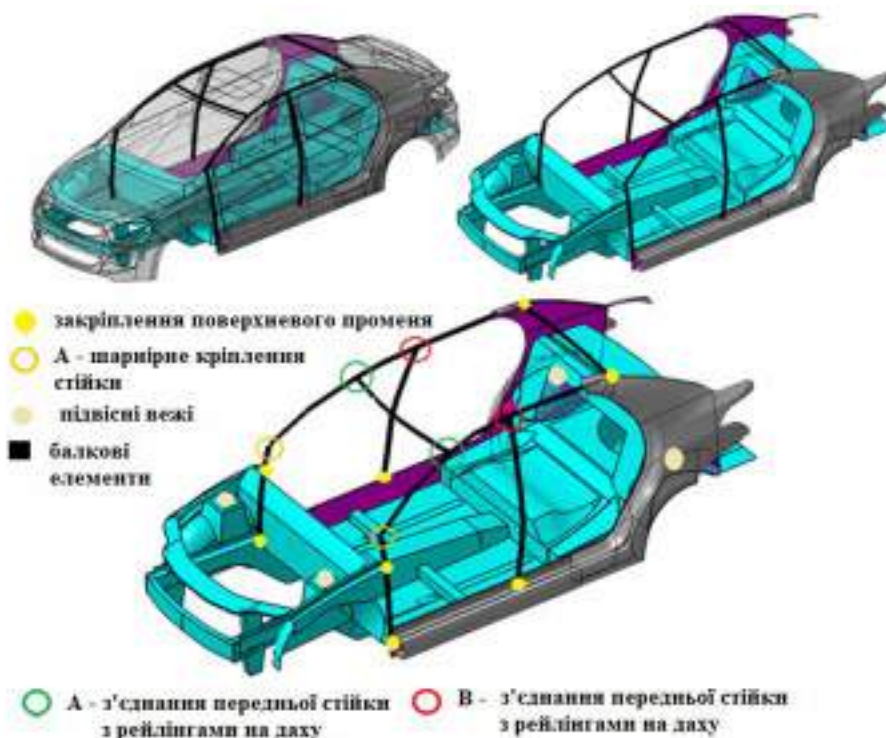


Рисунок 2.13 – З'єднання та конфігурація геометрії VMES.

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Основні параметри моделювання включають:

- розмір скінченно-елементної сітки близько 20 мм;
- використання комбінованих елементів (квадратних і трикутних) для побудови поверхонь;
- застосування матеріальної моделі сталі з модулем пружності близько 207 ГПа та модулем зсуву 79,3 ГПа;
- моделювання гнучких з'єднань за допомогою спеціальних кінематичних залежностей.

Завдяки поєднанню різних типів елементів і більш детальному опису геометрії, модель CBSM, рис. 2.13, дозволяє отримати більш точні результати порівняно зі спрощеними підходами, зберігаючи при цьому прийнятний рівень обчислювальної складності.

5) Жорсткість на вигин.

Постановка граничних умов для оцінки вигинальної жорсткості базується на підходах, що застосовуються під час реальних промислових випробувань. Незважаючи на відмінності у рівні деталізації моделей, для визначення як крутильної, так і вигинальної жорсткості використовується єдина методика.

У процесі моделювання всі варіанти конструкцій закріплюються в точках кріплення передньої та задньої підвісок, рис. 2.14. При цьому передні опори умовно представляються у вигляді жорстких пластин. У спрощеній моделі SSSM вузли підвісок зведені до окремих точок із зафіксованими поступальними ступенями свободи. У більш деталізованих моделях (CBSM, BMOS, BMES) фіксуються поступальні переміщення груп вузлів (приблизно по 25 у кожній зоні підвіски), рівномірно розподілених по периметру кріплення.

Для окремих моделей вводяться додаткові обмеження. Зокрема, у BMOS використано асиметричні граничні умови, які обмежують деформацію

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

площиною $x-z$. Навантаження прикладається по-різному залежно від типу моделі:

- у SSSM та BMOS – у вигляді зосередженої сили в зоні з'єднання середньої стійки з порогом;
- у VMES і CBSM – як розподілене навантаження (лінійне або у вигляді тиску) по елементах жорсткості.

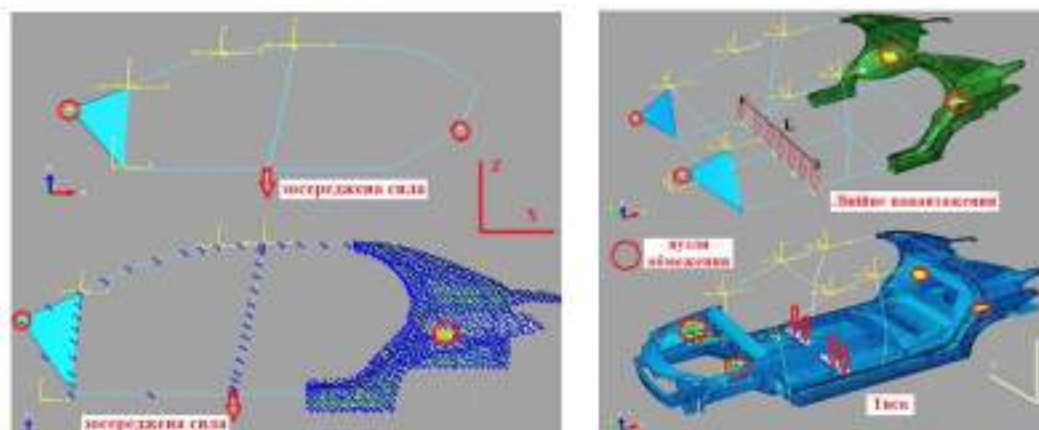


Рисунок 2.14 – Граничні умови в усіх представлених моделях.

Жорсткість на вигин визначається через співвідношення прикладеного навантаження до максимального переміщення конструкції у напрямку дії сили. При цьому у тривимірних моделях перевага надається розподіленим навантаженням, оскільки вони [11]: зменшують вплив локальних концентрацій напружень; забезпечують більш рівномірне навантаження всієї конструкції; дозволяють частково компенсувати спрощення моделі (наприклад, відсутність деяких з'єднань або дефектів).

Результати розрахунків, таблиця 2.2, показують, що зі збільшенням деталізації моделі значення жорсткості наближаються до експериментальних даних, а похибка зменшується.

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Таблиця 2.2 – Жорсткість на вигин для кожної моделі

Метод	Жорсткість на вигин (Н/мм)	Відсоткова помилка, %
SSSM	7142	51,7
CBSM	12714	14,0
BMOS	12614	15,5
BMES	12714	14,7
цільове значення	14800	-

Деформація дослідних моделей на які діють згинальні навантаження зображено на рис. 2.15.

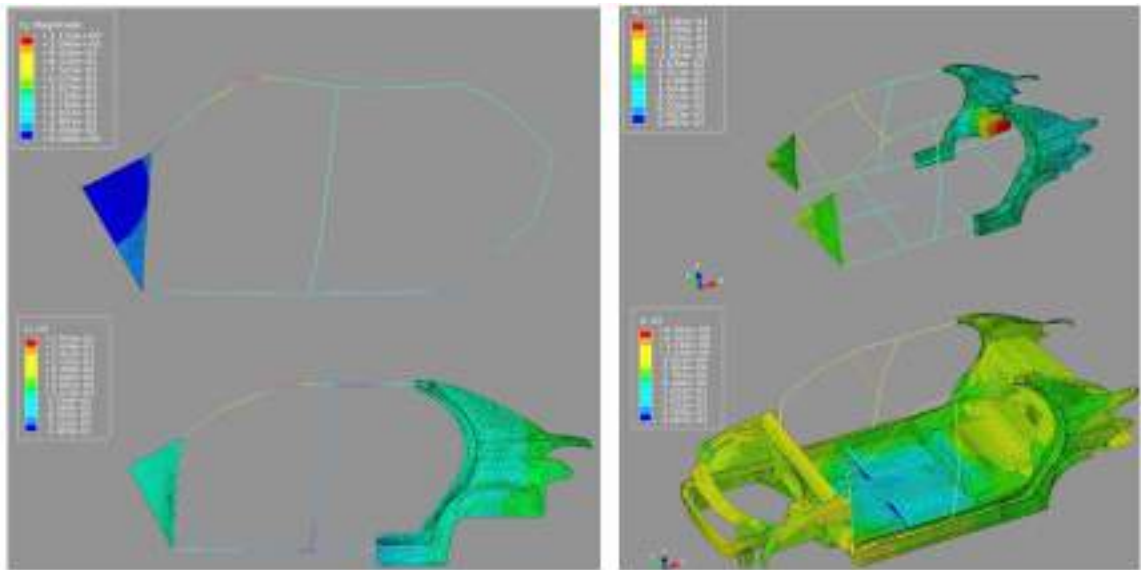


Рисунок 2.15 – Деформація моделей під навантаженням на згин.

б) Жорсткість при крученні кузова.

Оцінка крутильної жорсткості виконується різними способами залежно від типу моделі. Для спрощеної SSSM застосовується комбінований підхід, що поєднує аналітичні розрахунки та чисельне моделювання. Для більш складних моделей (BMES, BMOS, CBSM) використовується виключно метод кінцевих елементів.

Розрахунок у моделі SSSM.

Процес визначення крутильної жорсткості включає три основні етапи:

1. Спрощення конструкції. Кузов подається у вигляді системи плоских панелей (SSS-елементів), рис. 2.16, до яких прикладається крутний момент.

мають саме бічні панелі кузова, тому їх параметри визначаються з підвищеною точністю [12].

Ефективний модуль зсуву визначено лише для панелей бічних, для всіх інших його приймали рівним 79,3 ГПа. Розрахована крутильна жорсткість наведена в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Жорсткість на кручення для кожної моделі

Метод	Жорсткість на кручення (Н/мм)	Відсоткова помилка, %
SSSM	23762	42,28
VMOS	19857	18,90
VMES	17745	6,25
CBSM	17375	4,04
цільове значення	16700	-

Розрахунок у моделях VMES, VMOS і CBSM.

Для більш складних моделей використовуються умови, максимально наближені до експериментальних:

- вузли задньої підвіски частково фіксуються, допускаючи обертання;
- у моделі VMOS додатково застосовуються асиметричні умови деформації.

Крутний момент створюється за рахунок прикладання пари рівних і протилежно напрямлених сил до передніх опор підвіски. Його величина визначається як добуток сили на відстань між точками прикладання.

Крутильна жорсткість обчислюється як відношення прикладеного моменту до максимального переміщення відповідних вузлів конструкції. Прикладена сила вважалась рівною 1000 Н. На рис. 2.19 наведено розподіл граничних умов для кожної з моделей. Розрахункову деформацію моделей можна побачити на рис. 2.20. Аналіз відсотків похибок при розрахунках на вигин і жорсткості на кручення для розглянутих моделей наведено на рис. 2.21.

Узагальнення результатів.

Порівняння отриманих значень показує:

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

- найпростіша модель (SSSM) має найбільшу похибку;
- включення просторової геометрії та додаткових елементів (BMOS, VMES, CBSM) значно підвищує точність;
- зі збільшенням складності моделі похибка зменшується, що підтверджує ефективність методу кінцевих елементів.

Таким чином, використання більш деталізованих чисельних моделей є необхідною умовою для достовірної оцінки жорсткості кузова як при вигині, так і при крученнях, особливо на етапах остаточного проектування.

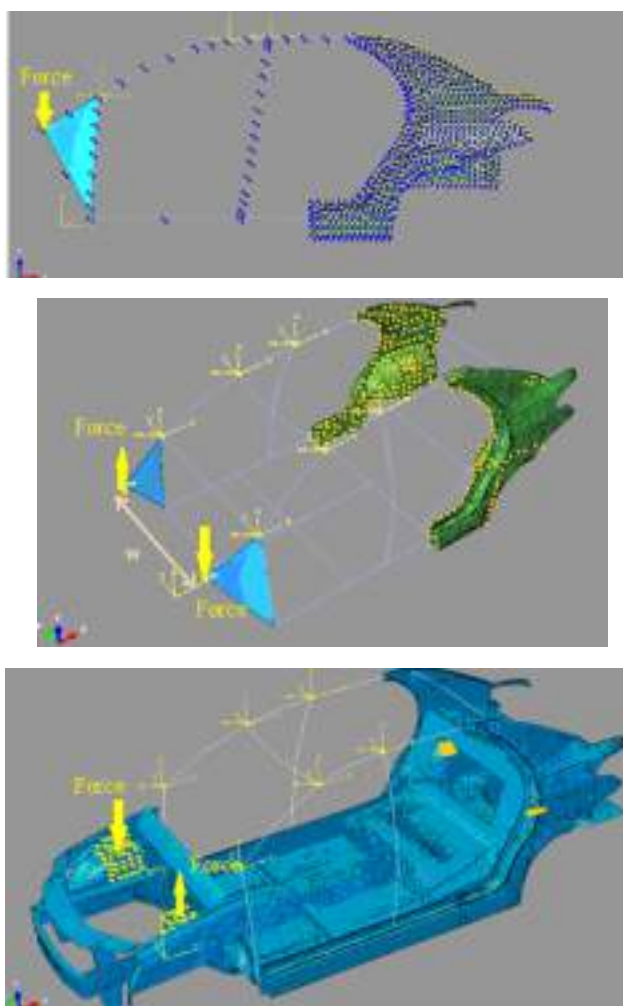


Рисунок 2.19 – Розподіл граничних умов для моделей (жорсткість на кручення).

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

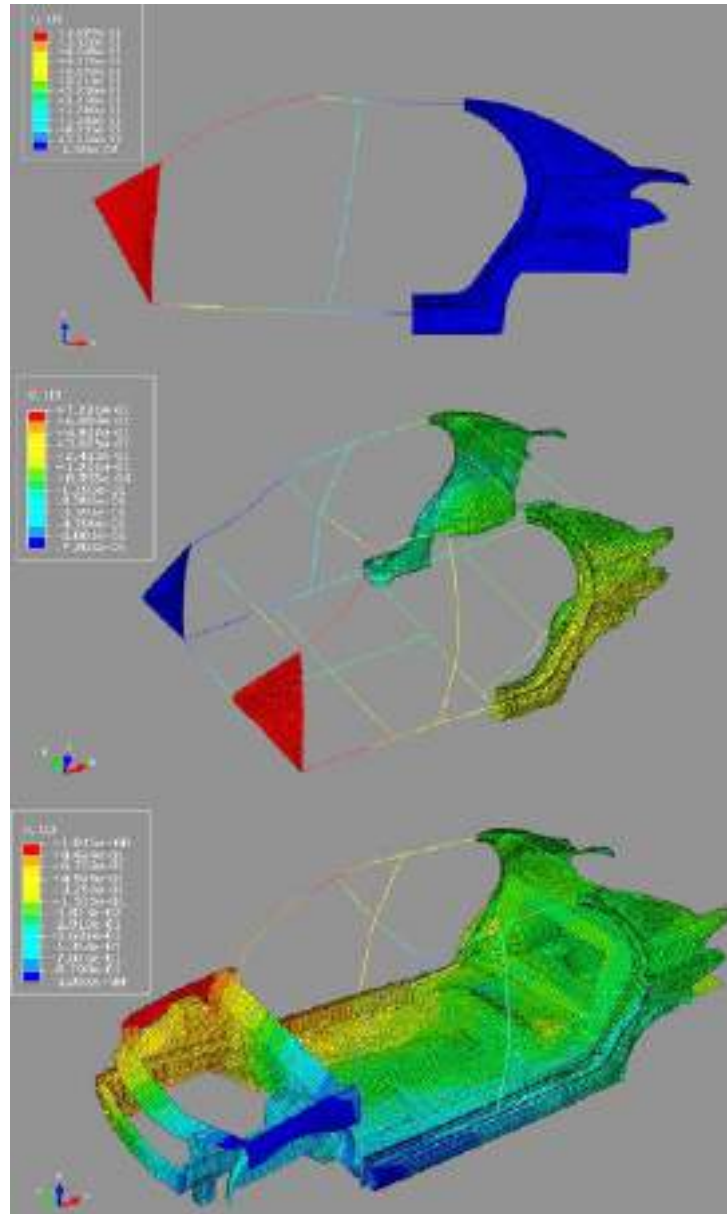


Рисунок 2.20 – Розподіл деформації при дії крутильного навантаження.

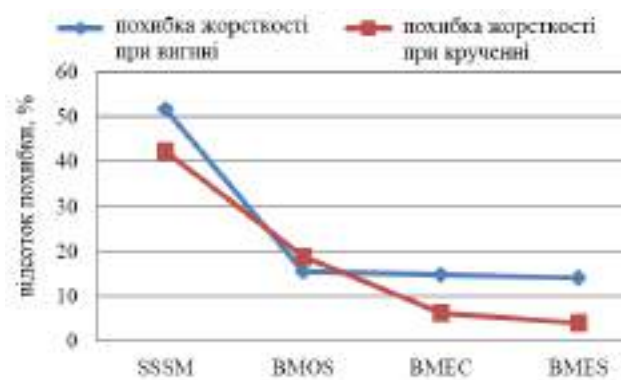


Рисунок 2.21 – Розподіл похибки в моделях.

3 КАРКАС БЕЗПЕКИ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

3.1 Призначення та конструктивні особливості каркасів безпеки спеціалізованих транспортних засобів.

Кузов або рама автомобіля є основним несучим елементом будь-якого колісного транспортного засобу, на якому розміщуються всі вузли та агрегати. У спеціалізованих транспортних засобах, зокрема гоночних автомобілях, автобусах та техніці спеціального призначення, широко застосовується просторовий каркас.

Каркас є однією з найважливіших конструктивних частин автомобіля, оскільки його міцність і жорсткість безпосередньо впливають на безпеку, керованість, вантажопідйомність та інші експлуатаційні характеристики. Для гоночних автомобілів питання оптимізації каркаса має особливе значення, адже зменшення маси навіть на незначну величину дозволяє підвищити ефективність і досягти кращих результатів у змаганнях.

Клітина безпеки являє собою просторову конструкцію, призначену для обмеження деформацій кузова у випадку аварії або перекидання автомобіля. Основними її елементами є дуги безпеки — просторові рамні структури з точками кріплення. Повний каркас безпеки включає головну дугу, передню дугу або бокові дуги, з'єднувальні елементи, діагональні підсилювачі, задні розпірки та вузли кріплення.

Спочатку каркаси безпеки застосовувалися переважно в ралійних автомобілях, однак з часом їх використання стало обов'язковим у більшості видів автоспорту. Як правило, вони виготовляються з круглих труб, оскільки така форма зменшує ризик травмування. Конструкція каркаса може варіюватися від простих дуг над головами екіпажу до складних просторових систем, які об'єднують у єдину силову структуру підвіску, пороги, боковини

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

та внутрішній об'єм салону. Основною функцією каркаса є захист водія шляхом зменшення деформації даху та збереження життєвого простору.

За способом виготовлення каркаси поділяються на розбірні (болтові) та нерозбірні (зварні). Розбірні конструкції складаються з труб, що з'єднуються болтами, що дозволяє при необхідності демонтувати каркас. Такі системи часто застосовуються у цивільних або напівспортивних автомобілях. Натомість зварні каркаси мають складнішу конструкцію, інтегруються в силову структуру кузова і використовуються переважно в автоспорті. Їх встановлення потребує повного демонтажу салону та виконання значного обсягу зварювальних робіт.

Каркаси можуть застосовуватися як у двох-, так і у чотиридверних кузовах, проте більш компактні кузова (наприклад, купе) характеризуються вищою жорсткістю [14]. Встановлення складного каркаса, як правило, призводить до зменшення кількості місць у салоні до двох, оскільки простір задніх сидінь використовується для розміщення елементів конструкції. Також каркас може обмежувати оглядовість, але водночас забезпечує можливість кріплення багатоточкових ременів безпеки.

Залежно від відповідності вимогам міжнародних стандартів каркаси поділяються на омологовані та неомологовані. Омологація передбачає підтвердження відповідності конструкції, матеріалів і технології виготовлення встановленим нормам автоспортивних організацій. У випадках відхилення від стандартних вимог необхідне проведення випробувань або розрахункове обґрунтування міцності.

Особливу увагу приділяють способу кріплення каркаса до кузова. У разі застосування зварювання або нестандартних конструктивних рішень омологація є обов'язковою. Водночас допускається використання болтових каркасів, які відповідають встановленим вимогам щодо матеріалів, геометрії та способу монтажу, рис. 3.1.

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Жорсткість кузова на кручення є однією з ключових характеристик, яка визначає поведінку автомобіля на дорозі. У спортивних автомобілях вона значно вища, ніж у серійних. Недостатня жорсткість призводить до затримки реакції на керування через деформації кузова, що порушує узгодженість роботи підвіски. Крім того, циклічні навантаження викликають втому металу, що з часом може призвести до руйнування зварних швів і розвитку корозії.



Рисунок 3.1 – Каркаси безпеки:
а – болтовий; б) – зварний

Встановлення каркаса безпеки суттєво змінює розподіл навантажень у конструкції автомобіля: основну частину сил сприймає саме каркас, а кузов виконує допоміжну функцію. Це підвищує загальну міцність і покращує керованість автомобіля.

До основних технічних вимог належать такі: головні та передні дуги повинні виготовлятися з цільних труб без з'єднань і мати гладку поверхню без дефектів. Їх геометрія повинна максимально відповідати формі кузова. Каркас має кріпитися до кузова через підсилювальні пластини певної товщини та площі з використанням болтових з'єднань високої міцності.

Допускається встановлення додаткових підсилювачів, поперечних елементів та елементів зміцнення даху, рис. 3.2. Обов'язковими елементами є

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

задні розпірки, які встановлюються під визначеним кутом і забезпечують додаткову жорсткість конструкції, рис. 3.3. Також передбачено використання діагональних та інших елементів, що підвищують опір деформаціям, рис. 3.4, 3.5.

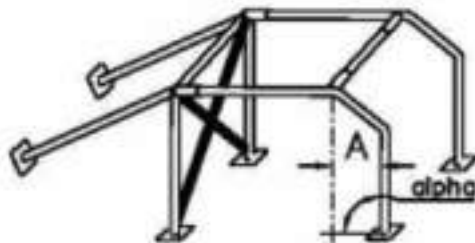


Рисунок 3.2 – Підсилювач задньої дуги каркасу безпеки

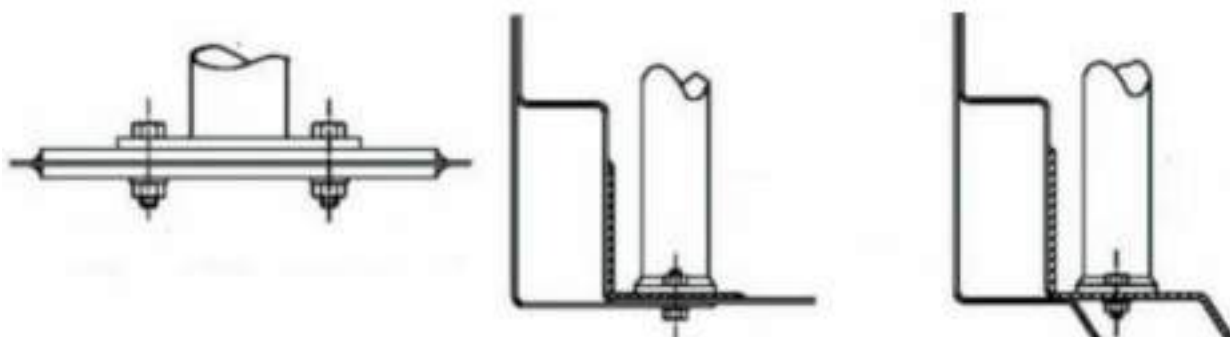


Рисунок 3.3 – Варіанти кріплення розпірок

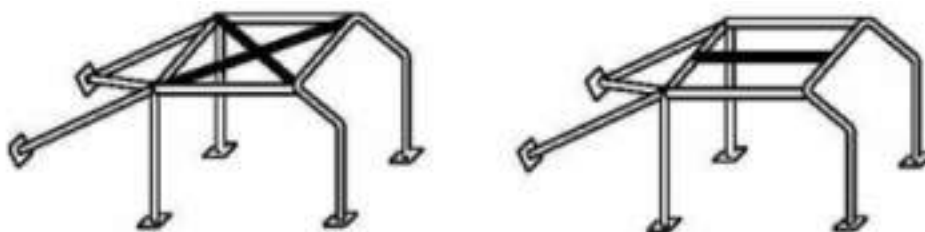


Рисунок 3.4 – Дах каркасу безпеки

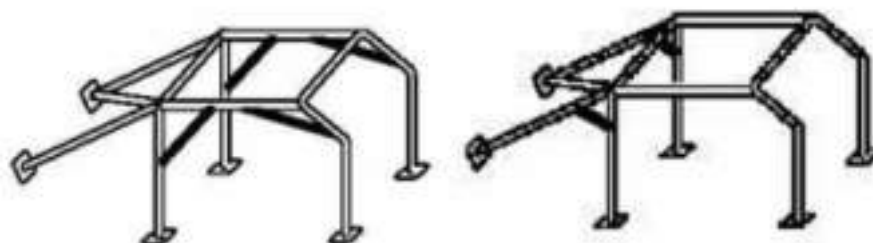


Рисунок 3.5 – Посилення згинів та з'єднань

					КВАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

У місцях можливого контакту водія з каркасом повинні встановлюватися спеціальні захисні накладки. Усі зварні з'єднання мають виконуватися з високою якістю та повним проваром, бажано із застосуванням сучасних технологій зварювання у захисному середовищі.

При використанні високоміцних або термооброблених сталей необхідно суворо дотримуватися технологічних рекомендацій, оскільки порушення режимів обробки може призвести до погіршення механічних властивостей матеріалу, зокрема підвищеної крихкості або зниження пластичності.

3.2 Елементи та матеріали каркасів.

Для виготовлення каркасів безпеки застосовується холоднотягнута безшовна труба з нелегованої вуглецевої сталі з вмістом вуглецю не більше 0,3%. Мінімальна межа міцності такого матеріалу повинна становити не менше 350 Н/мм². Рекомендовані типорозміри труб – 45×2,5 мм або 50×2,0 мм. Зазначений матеріал використовується для виготовлення головної дуги, бокових дуг та елементів їх з'єднання залежно від конструктивної схеми каркаса.

Вимоги до матеріалів, що використовуються для виготовлення каркасів безпеки, регламентуються відповідними стандартами і наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Специфікація використовуваних труб [14].

Матеріал	Мінімальна межа міцності	Розміри (мм)	Використання
Холоднотягнута, нелегована вуглецева сталь (безшовна труба), що містить максимум 0,3% вуглецю	350 Н/мм ²	45(1.75")x2,5 або 50(2.0")x2.0	Головна дуга, бічна дуга та їх з'єднання, залежно від конструкції.

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Для нелегованих сталей встановлюються обмеження щодо хімічного складу: вміст марганцю не повинен перевищувати 1%, а інших легувальних елементів – 0,5%. При виборі матеріалу особлива увага приділяється забезпеченню достатньої пластичності та доброї зварюваності.

Гнуття труб має виконуватися методом холодного деформування. При цьому радіус згину по осьовій лінії повинен бути не меншим за три зовнішні діаметри труби. У процесі згинання допускається незначна овальність перерізу, але співвідношення мінімального до максимального діаметра має становити не менше 0,9.

Конструкція каркаса безпеки складається з ряду функціональних елементів, кожен з яких виконує визначену роль у забезпеченні міцності та безпеки (рис. 3.6 і 3.7).

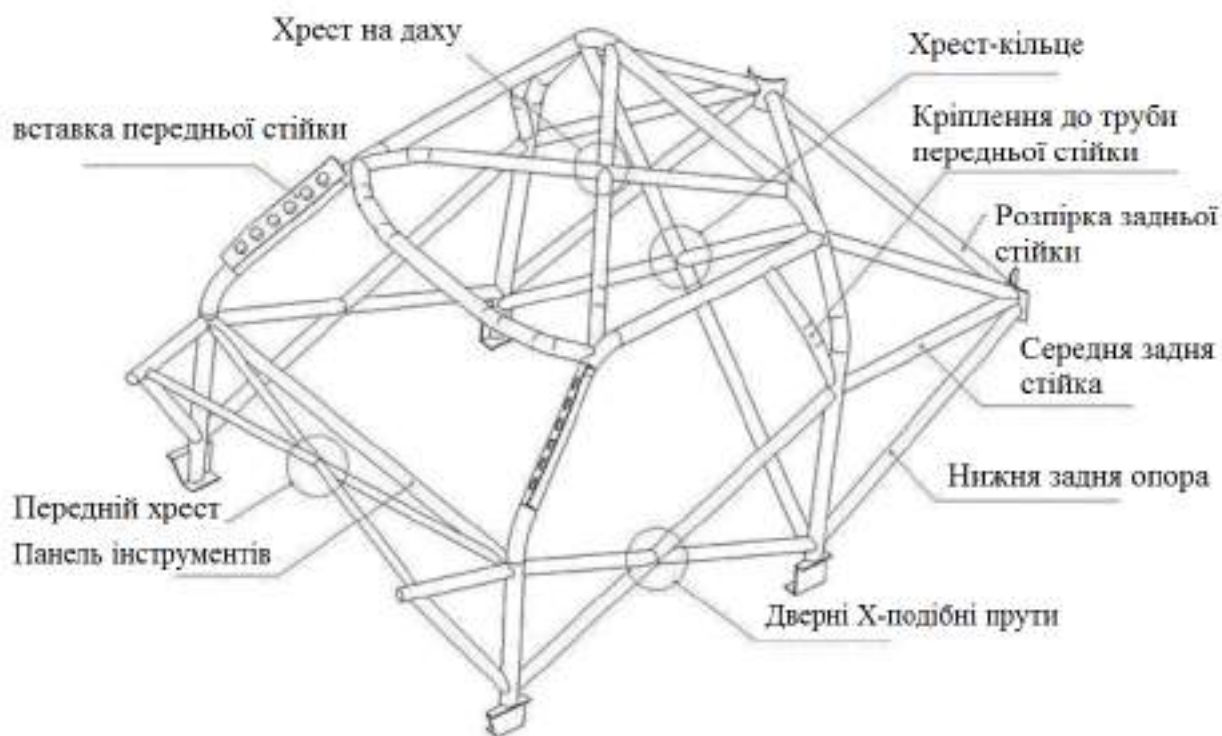


Рисунок 3.6 – Елементи Х подібного каркасу безпеки.

З'єднувальна вставка передньої стійки використовується для інтеграції каркаса з передньою стійкою кузова. Вона приварюється до труби каркаса та

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

елементів кузова, формуючи жорстке з'єднання і підвищуючи загальну міцність конструкції.

X-подібні елементи в зоні дверей призначені для підвищення стійкості до бічних ударів. Вони значно збільшують жорсткість дверного отвору та покращують захист екіпажу.

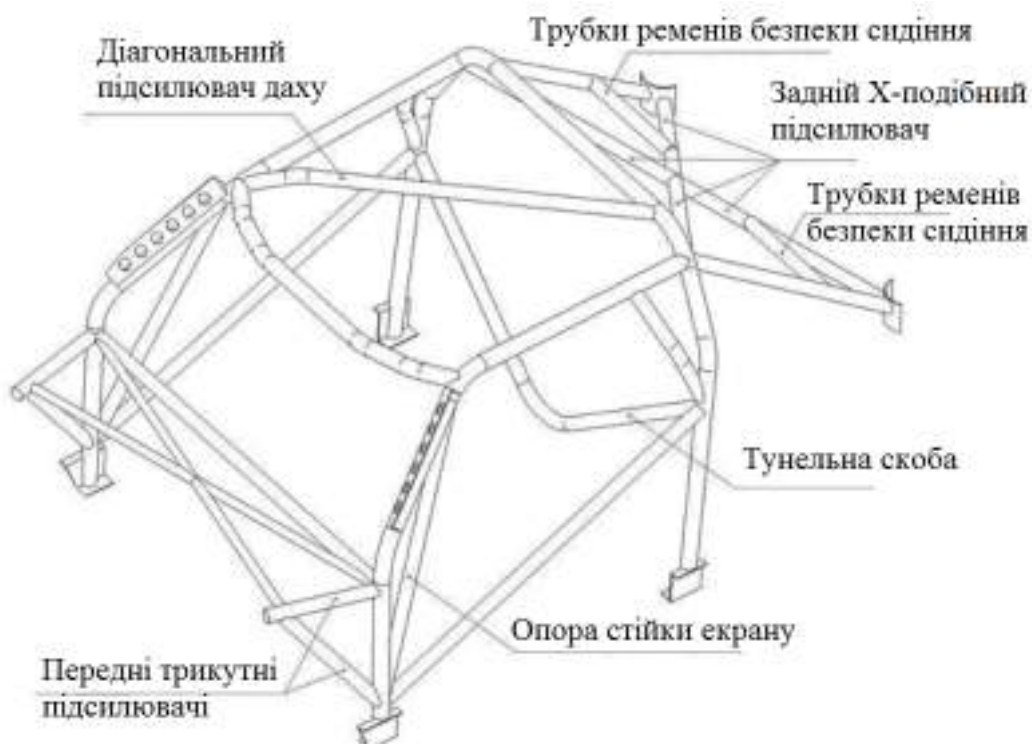


Рисунок 3.7 – Елементи V подібного каркасу безпеки.

Поперечна труба під панеллю приладів (панель інструментів) виконує функцію додаткового підсилення каркаса, особливо при бокових навантаженнях.

Елемент, що з'єднує дугу з передньою стійкою, забезпечує підтримку конструкції на рівні даху та підвищує її жорсткість.

Переднє поперечне перехрестя труб (Передній хрест) відповідає за сприйняття поперечних навантажень і підвищення просторової жорсткості передньої частини каркаса.

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

Середні задні розпірки (Середня задня стійка) з'єднують центральну частину каркаса із задньою частиною кузова, підвищуючи опір бічним ударам і зміцнюючи задню частину конструкції.

X-подібний елемент середньої дуги (Хрест-кільце) забезпечує додаткову жорсткість та запобігає деформаціям при перевертанні автомобіля.

Задня розтяжка між стійками (Розпірка задньої стійки) підвищує загальну міцність кузова, рівномірно розподіляє навантаження від підвіски та може використовуватися як точка кріплення ременів безпеки.

Нижні задні розпірки (Нижня задня опора) формують трикутну схему жорсткості, що сприяє підвищенню міцності задньої частини каркаса.

Підсилення даху у вигляді X-подібної або V-подібної конструкції (Хрест на даху або V подібний хрест) підвищує жорсткість верхньої частини каркаса та забезпечує додатковий захист при перекиданні.

Задній X-подібний підсилювач забезпечує більш рівномірний розподіл навантажень у задній частині конструкції порівняно з діагональними елементами та підвищує загальну міцність каркаса.

Підсилювач у зоні лобового скла (Опора стійки екрану) є важливим елементом для сучасних автомобілів із нахиленим вітровим склом. Він зміцнює передню частину даху та підвищує захист при фронтальних ударах.

Труби для кріплення ременів безпеки (Трубки ременів безпеки сидіння) забезпечують правильну геометрію встановлення ременів, зменшують їх довжину та підвищують ефективність утримання водія.

Діагональний підсилювач даху є спрощеним варіантом підсилення, який забезпечує меншу жорсткість порівняно з X-подібною схемою.

Кріплення до тунелю трансмісії (Тунельна скоба) підсилює центральну частину каркаса, сприяє розподілу навантажень і підвищує стійкість при бокових ударах та перевертанні.

Передні трикутні підсилювачі формують просторову структуру, яка передає навантаження від підвіски на каркас, зменшуючи навантаження на

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

кузов. Вони також забезпечують додатковий захист нижньої частини тіла екіпажу.

Таким чином, кожен елемент каркаса безпеки виконує конкретну функцію, а їх сукупність формує жорстку просторову конструкцію, здатну ефективно сприймати навантаження та забезпечувати високий рівень безпеки.

3.3 Проектування каркасу.

3.3.1 Схеми компоновання автомобіля.

Компоновання автомобіля визначається розташуванням силового агрегату та типом приводу, що безпосередньо впливає на експлуатаційні характеристики транспортного засобу. Залежно від цих факторів виділяють кілька основних схем.

Класична схема компоновання передбачає розміщення двигуна у передній частині автомобіля та передачу крутного моменту на задню вісь. Такий підхід широко застосовується як у серійному виробництві, так і при створенні індивідуальних конструкцій. Його перевагами є відносно рівномірний розподіл маси між осями, хороші динамічні характеристики та можливість використання стандартних вузлів. Разом з тим, недоліком є менш ефективне використання внутрішнього простору кузова, оскільки частина об'єму зайнята двигуном і карданною передачею.

Компоновання з переднім приводом характеризується тим, що передні колеса одночасно виконують функції ведучих і керованих. До основних переваг належать підвищена курсова стійкість, зменшені втрати енергії в трансмісії та більш раціональне використання внутрішнього простору автомобіля. Водночас така схема має і певні недоліки, зокрема ускладнену

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

конструкцію силового агрегату та можливе зниження зчеплення передніх коліс під час інтенсивного розгону.

Компонування із заднім розташуванням двигуна передбачає встановлення силового агрегату в задній частині автомобіля. Перевагами цієї схеми є покращене навантаження на ведучу вісь та можливість більш ефективної організації салону. Однак зменшення навантаження на передню вісь може негативно впливати на керуваність транспортного засобу.

Окремо слід розглянути повнопривідні схеми, при яких крутний момент передається на всі колеса. Такі системи можуть бути як постійними, так і з можливістю відключення однієї з осей. Основними перевагами є підвищена прохідність та краща стійкість на складних дорожніх покриттях. До недоліків відносяться складніша конструкція трансмісії, необхідність використання додаткових вузлів (зокрема роздавальної коробки) та збільшення енергетичних втрат, що призводить до підвищення витрати палива.

У межах даної роботи передбачається модернізація автомобіля BMW 3 Series з метою його використання в автоспортивних змаганнях, рис. 3.8. Однією з обов'язкових умов такої модернізації є встановлення каркасу безпеки для забезпечення захисту водія.

Основні технічні характеристики базового та модернізованого варіантів автомобіля наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняння характеристик базового та проектного автомобілів.

Показник	Базовий варіант	Проектований варіант
Потужність ДВЗ, кВт	100	300
Крутний момент, Нм	203	600
Споряджена маса, кг	1300	1450
Вантажопідйомність, кг	430	280
Максимальна швидкість, км/год	214	290
Вага ДВЗ, кг	135	250

У результаті модернізації передбачається суттєве підвищення потужності двигуна – зі 100 до 300 кВт, а також збільшення крутного моменту з 203 до 600 Н·м. Це дозволяє значно покращити динамічні характеристики автомобіля, зокрема підвищити максимальну швидкість до 290 км/год.

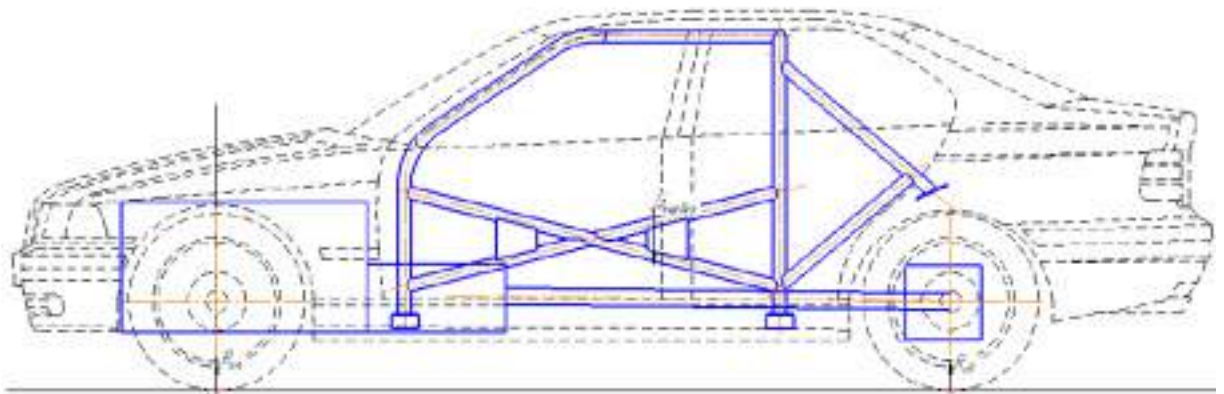


Рисунок 3.8 – Компонування транспортного засобу BMW 3.

Разом із цим спостерігається збільшення спорядженої маси транспортного засобу з 1300 до 1450 кг, що пов'язано із встановленням більш потужного двигуна та додаткових конструктивних елементів, включаючи каркас безпеки. Маса силового агрегату також зростає майже вдвічі.

Водночас вантажопідйомність автомобіля зменшується, що є характерним для спортивних модифікацій, де пріоритет надається динаміці та безпеці, а не перевезенню вантажів.

Таким чином, обрана компоновочна схема та проведена модернізація спрямовані на досягнення високих динамічних показників і забезпечення необхідного рівня безпеки при експлуатації автомобіля в умовах автоспорту.

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

3.3.2 Аналіз реакцій на колеса транспортного засобу.

Визначення положення центру мас транспортного засобу є необхідним етапом під час розрахунків нормальних реакцій опорної поверхні, сил зчеплення коліс з дорогою у тяговому та гальмівному режимах, а також при оцінці стійкості автомобіля.

Для обчислення координат центру мас (ЦМ) використовується набір вихідних параметрів, наведених у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Масив вихідних даних для розрахунку координат центру мас проектного транспортного засобу

Параметр	Розмірність	Значення
Власна споряджена маса, m_0	кг	1380
в т.ч. на передню вісь, m_{01}	кг	820
в т.ч. на задню вісь, m_{02}	кг	560
Повна маса, m_A	кг	1730
Маса багажу, m_B	кг	120
Маса каркасу безпеки, m_{KB}	кг	80
Кількість місць, Z_n	шт	2
Маса пасажирів, кг	кг	150
Статичний радіус колеса, r_K	мм	295
База автомобіля, L	мм	2700

До основних параметрів належать споряджена маса автомобіля, розподіл маси по осях, повна маса, маса додаткових елементів (багажу, каркасу безпеки), кількість місць, маса пасажирів, а також геометричні характеристики, зокрема база автомобіля та статичний радіус колеса.

Для визначення координат центру мас спочатку формується розрахункова схема транспортного засобу. На першому етапі розглядається порожній автомобіль. Відносно передньої осі (точки А) складається рівняння моментів, що дозволяє визначити положення центру мас.

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Ордината центру мас порожнього автомобіля у першому наближенні приймається 442,5 мм за емпіричною залежністю (формула 3.1).

$$h_0 = 1,5r_K . \quad (3.1)$$

Абсциса центру мас визначається з рівняння моментів відносно передньої осі (рис. 3.9), що дозволяє врахувати розподіл маси між передньою та задньою осями (формули 3.2–3.3). Розраховано, що

$$x_{0n} = \frac{80 \cdot 1605 + 560 \cdot 2700}{1380} = 1190 \text{ мм.}$$

$$(m_1 l_1 + m_{02} L - m_0 x_{0n}) g = 0 , \quad (3.2)$$

$$x_{0n} = \frac{m_1 l_1 + m_{02} L}{m_0} , \quad (3.3)$$

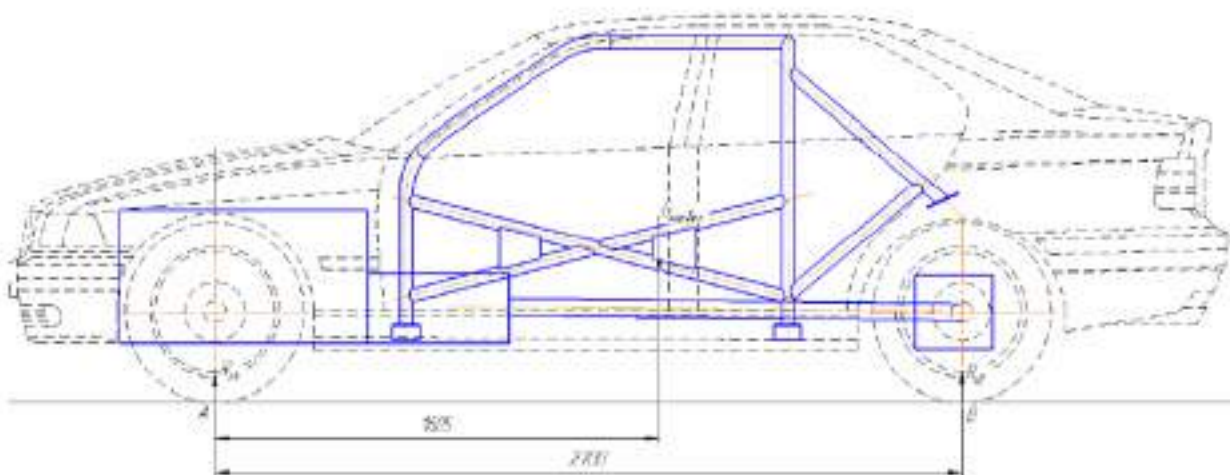


Рисунок 3.9 – Схема автомобіля для визначення координат центру ваги.

Після цього виконується аналогічний розрахунок для навантаженого автомобіля. Для цього будується відповідна розрахункова схема (рис. 3.10), яка враховує додаткові маси пасажирів, багажу та каркасу безпеки.

Абсциса центру мас навантаженого автомобіля визначається шляхом складання рівняння моментів відносно передньої осі (формули 3.4–3.5). Це

дозволяє врахувати зміну розподілу маси при експлуатаційному навантаженні.

$$(m_0 l_1 + m_1 l_2 + m_2 l_3 + m_3 l_4) g = 0, \quad (3.4)$$

$$x_0^N = \frac{m_0 l_1 + m_1 l_2 + m_2 l_3 + m_3 l_4}{m_A} \quad (3.5)$$

$$x_0^N = \frac{1380 \cdot 1190 + 150 \cdot 1410 + 80 \cdot 1605 + 120 \cdot 3145}{1730} = 1365 \text{ мм}$$

На відміну від порожнього автомобіля, ордината центру мас завантаженого транспортного засобу визначається окремо, оскільки спрощена залежність (3.1) у цьому випадку не застосовується. Для цього складається рівняння моментів відносно точки А з урахуванням усіх складових маси та їх положення (рис. 3.11, формули 3.6–3.7).

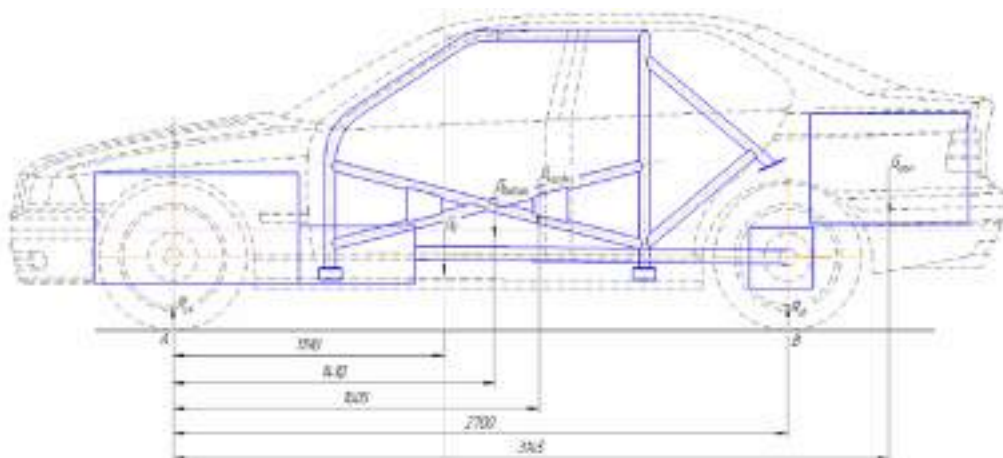


Рисунок 3.10 – Розрахункова схема визначення координат ЦМ завантаженого автомобіля

Отримані координати центру мас для порожнього та повністю навантаженого автомобіля дозволяють оцінити зміну положення ЦМ залежно від умов експлуатації. Графічне відображення цих положень наведено на рис. 3.12.

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

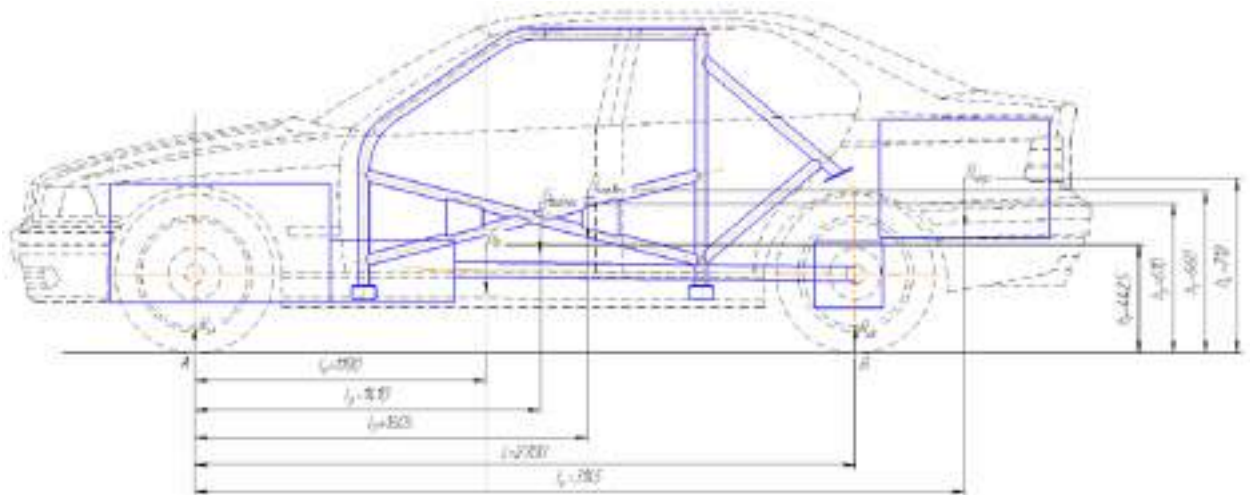


Рисунок 3.11 – Розрахункова схема звантаженого автомобіля.

$$(m_0 \cdot h_1 + m_1 \cdot h_2 + m_2 \cdot h_3 + m_3 \cdot h_4 - m_A \cdot h_A) \cdot g = 0, \quad (3.6)$$

$$h_g = \frac{m_0 \cdot h_1 + m_1 \cdot h_2 + m_2 \cdot h_3 + m_3 \cdot h_4}{m_a} = 0 \quad (3.7)$$

$$h_g = \frac{1380 \cdot 442,5 + 150 \cdot 610 + 80 \cdot 660 + 120 \cdot 712}{1730} = 485 \text{ мм}$$

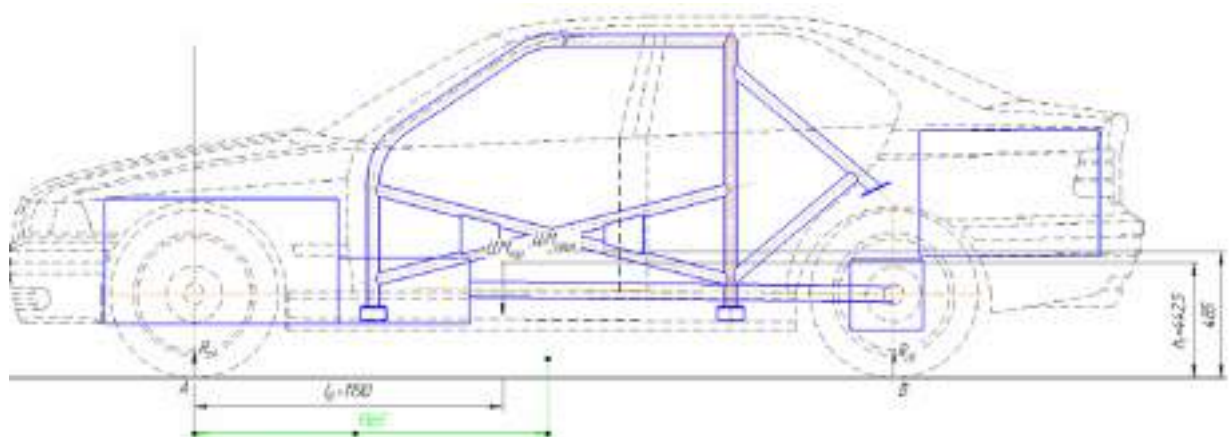


Рисунок 3.12 – Центри ваги порожнього та звантаженого автомобіля

Таким чином, визначення координат центру мас є важливим етапом розрахунку, що забезпечує подальше коректне визначення реакцій опорної поверхні, а також аналіз динамічної поведінки та стійкості транспортного засобу.

3.3.3 Монтаж каркасу безпеки.

Монтаж каркасу безпеки виконується з урахуванням встановлених нормативних вимог щодо місць його з'єднання з кузовом автомобіля. Кріплення допускається як болтовими з'єднаннями, так і зварюванням. Однак у сучасних умовах професійного автоспорту перевага надається саме зварним з'єднанням. У такому випадку труби каркаса приєднуються до кузова через спеціальні підсилювальні елементи (косинки) та закріплюються на заздалегідь підготовлених і зміцнених ділянках підлоги.

Основними конструктивними елементами каркасу, окрім головної дуги, є передня та бокові дуги. Відповідно до вимог FIA, ці елементи повинні виготовлятися з цільних відрізків холоднотягнутих безшовних труб із низьковуглецевої сталі (вміст вуглецю не більше 0,3%). Рекомендовані розміри таких труб становлять 50×2 мм або 45×2,5 мм [16]. Для допоміжних елементів допускається використання труб меншого діаметра, наприклад 38×2,5 мм або 40×2 мм.

Конструкція каркасу для кожної конкретної моделі автомобіля розробляється індивідуально з урахуванням її геометричних і конструктивних особливостей. Зазвичай каркас постачається у вигляді комплекту, що включає підготовлені (зігнуті та нарізані) труби, технічну документацію з описом складу і послідовності складання, а також ідентифікаційну табличку виробника, яка повинна бути встановлена на готовій конструкції.

Процес складання каркасу повинен здійснюватися у суворій відповідності до наданої схеми. Порушення послідовності монтажу може призвести до ускладнень, коли окремі елементи неможливо встановити через обмежений простір або геометричні перешкоди.

З'єднання труб між собою виконують зварюванням. Згідно з вимогами безпеки, рекомендованим є електродугове зварювання в середовищі

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

захисного газу, при якому зварний шов повинен повністю охоплювати периметр труби, забезпечуючи необхідну міцність і надійність з'єднання.

Практична реалізація цих вимог ускладнюється тим, що елементи каркасу розміщуються максимально близько до поверхонь кузова та даху. У деяких вузлах може сходитися декілька труб, що ускладнює доступ до місць зварювання. Незважаючи на це, монтаж каркасу зазвичай виконується без демонтажу даху, хоча в окремих випадках така операція може бути необхідною. Ілюстрації виготовлення каркасу безпеки наведена в додатку А.

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

ВИСНОВКИ

1. Конструкція даху легкового автомобіля зазвичай не проходить обов'язкових випробувань на стійкість при перекиданні, хоча саме такі аварії становлять значну частку смертельних випадків. Найбільш схильними до перекидання є автомобілі з підвищеним кліренсом, зокрема позашляховики та деякі спортивні моделі, у яких підвищення дорожнього просвіту призводить до зміщення центру ваги вгору.

2. Розвиток сучасних методів інженерного аналізу, зокрема кінцево-елементного моделювання та використання високопродуктивних обчислювальних систем, відкрив можливість дослідження складних технічних об'єктів. Використання цифрових моделей (цифрових двійників) суттєво вдосконалило процеси проєктування, аналізу та сертифікації транспортних засобів.

3. Проведений аналіз показує, що похибки у визначенні жорсткості кузова для досліджених моделей є незначними, що підтверджує достатню точність і адекватність застосованих методів моделювання несучих конструкцій автомобілів.

4. Конструкція каркасу безпеки формується індивідуально для кожної моделі автомобіля. У більшості випадків він постачається у вигляді комплекту готових елементів із відповідною технічною документацією, що визначає порядок його складання та встановлення.

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи технології виробництва та ремонту автомобілів : Навчальний посібник / Укладачі : Гевко І.Б., Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л., Гудь В.З., Левкович М.Г., Сташків М.Я., Сіправська М.Д. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. – 544 с.
2. Автомобільні кузови. Частина 1 : навч. посіб. / О. М. Артюх, О. В. Дударенко, В. В. Кузьмін та ін. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 292 с.
3. Технічне обслуговування й ремонт металевих кузовів автомобілів / Бабіч Б. С., Лущик В. В. . – К. : Либідь, 2001. – 459 с
4. Електронний ресурс: <https://autonews.autoua.net/novosti/7455-krash-test-kabrioletov-na-oprokiyvanie-shansy-na-.html>
5. Електронний ресурс: <https://news.infocar.ua/crashtest>
6. M.H. Shojaeefard et al. / Investigation on the optimal simplified model of BIW structure using FEM // Shojaeefard M.H. et al., «Latin American Journal of Solids and Structures», 12 (2015) . – P 1972-1990.
7. E. Zhilenkova. Approaches to assessing the characteristics of a vehicle body based on a virtual test bench / Zhilenkova E, Cvetkov P, Epifantsev I. // E3S Web of Conferences 258, 09077 (2021) . – P 11-17.
8. Practical aspects of finite element simulation / Ranjan R., Hanchate V., Urquiza A., 3rd ed. Colombia, Altair Engineering. – 2015. – 503 p.
9. W Chen. Component sensitivity analysis of conceptual vehicle body for lightweight design under static and dynamic stiffness demands / Chen, W., Zuo, W., // International Journal of Vehicle Design 66(2). – 2014. – P. 10-23.
10. Y. Dai. Beam element modelling of vehicle body-in-white applying artificial neural network./ Dai, Y., Duan C. // Applied Mathematical Modelling 33(1). – 2009. – P. 2808–2817.

					КВРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

11. S.B. Lee. Numerical approximation of vehicle joint stiffness by using response surface method / Lee, S.B., Park, J.R., Yim, H.J.// International Journal of Automotive Technology 3(3). – 2012. – P. 117–122.

12. D. Mundo. Simplified modelling of joints and beam-like structures for BIW optimization in a concept phase of the vehicle design process / Mundo, D., Hadjitb, R., Dondersb, S., Brughmansb, M., Masb, P., Desmetc, W. // Finite Elements in Analysis and Design 45. – 2009. – P. 456–462.

13. P. Doke. Vehicle concept modeling: A new technology for structures weight reduction / Doke, P., Fard, M., Jazar, R. // Procedia Engineering 49. – 2012. – P. 287–293.

14. Електронний ресурс: <https://www.amortizator.ua/tech-info-Wiechers-Roll-bars>.

15. Основні регламентуючі документи обов'язкові до виконання при проведенні автомобільних змагань на території України. Офіційний спортивний щорічник автомобільної федерації України. – 2006. – 280 с.

16. Електронний ресурс: <https://gsi-rally.livejournal.com/18436.html>.

					КВРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					КвРАТ. 22085.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59