

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

## Пояснювальна записка

до дипломної роботи

бакалавра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Галузь знань 27 Транспорт  
Шифр і назва галузі знань

Напрямок підготовки (спеціальність): 274 «Автомобільний транспорт».

Шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності)

на тему: **«Моделювання каркасу безпеки на базі  
легкового автомобіля»**

Шифр ДРАТТАМ 23.20112.000 ПЗ

Виконав: *студент 3-го курсу,*  
група АТс-20-2



Підпис

Р. А. Саух  
Ініціали, прізвище

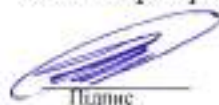
Керівник *к.т.н., доц. каф ТАМ.*



Підпис

С. Ф. Посонський  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри ТАМ *д.т.н., проф.*



Підпис

О. В. Диха  
Ініціали, прізвище

9 06 2023 р.

Хмельницький, 2023

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *інженерії, транспорту та архітектури*  
Кафедра *трибології, автомобілів та матеріалознавства*

Освітній рівень *бакалавр*

Спеціальність **274 «Автомобільний транспорт».**

Спеціалізація **«Автомобільний транспорт».**

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ТАМ



*Диха О.В.*  
6 березня 2023 року

## З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

**Сауху Роману Анатолійовичу**

Прізвище, ім'я, по батькові

- 1. Тема роботи:** Тюнінг ходової частини легкового автомобіля  
**керівник роботи:** Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, місце зв'язку

Затверджено наказом університету від 1.03.2023 р. № 5 (Д 26)

- 2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру** 16.06.2023 р.  
**3. Вихідні дані до проекту (роботи)** *Матеріали курсових проектів.*  
**4. Зміст пояснювальної записки** (перелік питань, які потрібно розробити)  
1) *Аналіз конструкції несучої системи автомобіля.*  
2) *Безпека та міцність кузовних конструкцій автотранспортних засобів.*  
3) *Каркас безпеки спортивного автомобіля.*  
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 06 березня 2023 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз конструкції несучої системи автомобіля	24.04.23	вик
2	Безпека та міцність кузовних конструкцій автотранспортних засобів.	16.05.23	вик
3	Каркас безпеки спортивного автомобіля	26.05.23	вик
4	Висновки, рекомендації	10.06.23	вик
5	Оформлення пояснювальної записки	12.06.23	вик
6	Допуск до захисту	14.06.23	вик
7	Захист дипломної роботи	16.06.23	

Студент

  
Ідентифікація

Саух Р. А.  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Ідентифікація

Посонський С. Ф.  
Ініціали, прізвище

ЖО

## РЕФЕРАТ

Студент групи АТС-20-2 Саух Р.А.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему «Моделювання каркасу безпеки на базі легкового автомобіля» складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 16 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 3 додатків розміщених на 18 сторінках. Роботу викладено на 67 сторінках, з них 60 сторінок основного тексту, на яких розміщено 40 рисунків і 7 таблиць.

Автомобільний кузов є своєрідним «скелетом» всього автомобіля і вирішує одночасно кілька завдань: сприйняття робочого навантаження (пасажирів та вантаж), захист водія та пасажирів від травм при виникненні аварійних ситуацій тощо.

Таким чином, проектування каркасів і рам автомобілів можна віднести до дуже трудомісткого з погляду інженерно-технічних витрат завданням, тому що необхідно вирішувати часом суперечливі завдання і вимоги.

Особливу роль при проектуванні кузова чи каркаса відіграє його оптимізація структури із застосуванням сучасних методів проектування, у тому числі - метод кінцевих елементів (МКЕ).





Мета роботи: моделювання каркасу безпеки автомобіля з дослідженням його міцності і жорсткості.

Сучасні досягнення в області математичного моделювання, кінцево-елементних моделей, високої продуктивності обчислювальної техніки зробили можливим моделювання надзвичайно складних технічних систем і комплексів. Цифрові близнюки, побудовані на основі цих технологій, змінили багато підходів до інженерних розрахунків, а також до проектування та сертифікації.

*Ключові слова: НУСЧА СИСТЕМА; КУЗОВ; КАРКАС; ЖОРСТКІСТЬ; МОДЕЛЬ; МЕТОД КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ.*

## ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ НЕСУЧУОЇ СИТЕМИ АВТОМОБІЛЯ	7
1.1 Класифікація та вимоги до кузовів автомобілів.	7
1.2 Будова кузова автомобіля.	10
1.3 Жорсткість кузова.	11
1.4 Матеріали для виготовлення кузовів.	13
2 БЕЗПЕКА ТА МІЦНІСТЬ КУЗОВНИХ КОНСТРУКЦІЙ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.	16
2.1 Аналіз пошкоджень кузовних конструкцій автотранспортних засобів.	16
2.2 Аналіз існуючих систем та технологій перевірки міцності кузовів автомобілів.	19
2.2.1 Тест на міцність даху PHS.	19
2.2.2 Система випробування міцності даху VIA.	21
2.3 Аналіз методів розрахунку несучих властивостей конструкцій.	22
2.4 Підходи до оцінки характеристик кузовів автомобіля на основі віртуального випробувального стенду.	26
2.5 Дослідження жорсткості та міцності несучої системи автомобіля на спрощених моделях методами кінцевих елементів.	33
2.5.1 Проста модель структурної поверхні (SSSM).	33
2.5.2 Модель на основі балки для однієї сторони автомобіля (BMOS).	33
2.5.3 Модель на балці для всього кузова автомобіля (BMES).	34
2.5.4 Модель пов'язаної поверхні променя (CBSM).	34
2.5.5 Аналіз жорсткості на вигин.	35
2.5.6 Аналіз жорсткості на кручення.	38
3 КАРКАС БЕЗПЕКИ СПОРТИВНОГО АВТОМОБІЛЯ	46
3.1 Аналіз конструкцій та призначення каркасу безпеки спортивних автомобілів.	46
3.2 Назви та призначення елементів каркасів.	54
3.3 Побудова каркасу безпеки.	57
3.3.1 Загальне компонування транспортного засобу.	57
3.3.2 Визначення реакцій опорної поверхні на колеса автомобіля.	59
3.3.3 Складання каркасу.	62
ВИСНОВКИ	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	65
ДОДАТКИ	67

ДРАТТАМ 23.20112.000 ПЗ				
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата
Виконав		Саух		
Перевір.		Посонський		
Н.контр.		Бабак		
Затвер.		Диха		
Моделювання каркасу безпеки на базі легкового автомобіля			Літера	Аркуш
			4	67
ХНУ АТс-20-2				

## ВСТУП

Як відомо, собівартість виготовлення рамних конструкцій та кузовів в автомобілях може сягати половини від загальної вартості. Це, у свою чергу, пов'язано з постійним посиленням нормативно-законодавчих вимог до безпеки автомобілів, підвищення конкурентоспроможності та зниженням собівартості виготовлення. Автомобільний кузов є своєрідним «скелетом» всього автомобіля і вирішує одночасно кілька завдань: сприйняття робочого навантаження (пасажирів та вантаж), захист водія та пасажирів від травм при виникненні аварійних ситуацій тощо.

Таким чином, проектування каркасів і рам автомобілів можна віднести до дуже трудомісткого з погляду інженерно-технічних витрат завданням, тому що необхідно вирішувати часом суперечливі завдання і вимоги.

Особливу роль при проектуванні кузова чи каркаса відіграє його оптимізація структури із застосуванням сучасних методів проектування, у тому числі - метод кінцевих елементів (МКЕ).

У разі гоночних автомобілів (болідів) завдання оптимізації каркаса набуває найбільш важливого значення, тому що економія кожного кілограма і навіть грама матеріалу дозволяє отримати найкращий результат у гонці.

При змаганнях в будь-яких гонках не обходиться без аварій та перекидань автомобілів, не рідко з важкими травмами водіїв. Звичайно, найкращим способом запобігти цьому є захист автомобіля від перевероту, за що відповідають різні електронні системи, але, якщо уникнути аварії не вдалося, у справу вступає кузов автомобіля. Звісно ж, міцніші дахи та стійки менше мнуться, зменшуючи ризик того, що люди постраждають від контакту з металом.

Міцність даху визначається шляхом штовхання металевої пластини на один її бік з повільною, але постійною швидкістю. Згідно з методикою випробувань, дах повинен витримувати силу щонайменше в 4 рази

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

перевищує масу транспортного засобу, перш ніж пластина зімне дах на 5 дюймів (12,7 сантиметра).

Метою роботи є моделювання каркасу безпеки автомобіля з дослідженням його міцності і жорсткості.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано та вирішено такі основні завдання:

1. Аналіз конструкції та умов роботи несучих систем автомобілів.
2. Огляд та аналіз існуючих методів і моделей перевірки міцності несучих систем автомобілів.
3. Дослідження жорсткості та міцності несучої системи автомобіля на спрощених моделях методами моделювання.
4. Рекомендації до встановлення каркасу автомобіля з підвищенням рівня безпеки.

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

# 1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ НЕСУЧУОЇ СИСТЕМИ АВТОМОБІЛЯ

## 1.1 Класифікація та вимоги до кузовів автомобілів.

Кузов (рама чи каркас) є базовим несучим елементом практично будь-якого наземного колісного транспортного засобу та призначений для встановлення на ньому всіх вузлів та агрегатів.

Каркас, як правило, використовується в гоночних автомобілях (болідах), автобусах та інших спеціальних автомобілях. Каркас є найбільшою, дорогою і важливою складовою автомобіля, так як від його міцності та жорсткості залежать такі важливі показники, як керованість, безпека, вантажопідйомність та ряд інших.

На рисунку 1.1 представлено два основні види кузовів транспортних засобів.



Рисунок 1.1 – Кузов автомобіля

Несучий кузов прийшов на зміну рамної конструкції автомобіля. Грубо кажучи, він поєднує раму і кузов в одне ціле і має додаткові посилення в необхідних місцях. Раму заміщають поздовжні (лонжерони) та поперечні силові елементи.

Деякі автомобілі, такі як вантажівки та деякі позашляховики, як і раніше, мають рамну конструкцію.

Несучий кузов має схожий принцип та дизайн, який роками використовувався в авіабудуванні ще до появи його в автомобілях. Під

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

автомобільною рамою розуміють різновид несучої системи балочної конструкції, яка в даний час використовується на легкових автомобілях підвищеної прохідності, деяких моделях спортивних автомобілів та вантажних автомобілів [1].

Вимоги до конструкції каркаса (кузова). Каркас (кузов) автомобіля, будучи одним з найважливіших його складових частин повинен задовольняти низку різних вимог. Залежно від типу автомобіля до конструкції каркасів та кузовів (для вантажних автомобілів - рам) пред'являються, у свою чергу, ще й специфічні вимоги. У результаті всі основні вимоги щодо типів автомобілів можна представити так:

1) вантажні автомобілі;

- продуктивність, заснована на несучій здатності рами або каркасу;
- тип кузова (бортова платформа, самоскид, цистерна тощо);
- габаритні розміри;
- зовнішній вигляд та ергономіка кабіни;

2) автобуси:

- продуктивність (пасажиромісткість);
- тип кузова та компонування;
- конструкція пасажирського та багажного відділень;

3) легкові автомобілі:

- комфорт пасажирів;
- клас легкового автомобіля;
- мінімізація маси;

4) загальні:

- відповідність конструкції каркасу (кузова) призначенню;
- довговічність та надійність конструкції каркаса або рами;
- економічність та маса (мінімізація маси при забезпеченні відповідної жорсткості та міцності);
- пасивна безпека каркаса (кузова або рами);

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8





### 1.3 Жорсткість кузова.

Жорсткість - це властивість кузова автомобіля чинити опір динамічним і статистичним навантаженням в процесі експлуатації. Вона безпосередньо впливає на керованість. Чим вище жорсткість, тим краще керованість автомобіля.

Жорсткість залежить від типу кузова, загальної геометрії, кількості дверей, розміру машини та вікон. Велику роль також відіграє кріплення та положення лобового та заднього скла. Вони можуть збільшити жорсткість на 20-40%. Для збільшення жорсткості встановлюються різні розпірки-підсилювачі.

Найбільш стійкими вважаються хетчбеки, купе та седани. Як правило, це триоб'ємне компонування, яке має додаткові перегородки між багажним відділенням та двигуном. Недостатню жорсткість показують кузови типу універсал, пасажирський, мікроавтобус [2].

Є два параметри жорсткості - на вигин і кручення. На кручення перевіряють опір при тиску в протилежних точках щодо його поздовжньої осі, наприклад, при діагональному вивішуванні. Як уже було сказано, сучасні автомобілі мають цілісний несучий кузов. У таких конструкціях жорсткість забезпечується головним чином за рахунок лонжеронів, поперечних та поздовжніх балок.

Зони деформації є частиною само несучого кузова (рис. 1.4), яка була навмисно ослаблена для сил в одному напрямку через використання легше деформованих матеріалів, ніж в інших частинах кузова. Зони деформації включають, наприклад, багажник чи передню частину моторного відсіку. У разі зіткнення область у зоні деформації буде вм'ятини у заздалегідь розрахованому порядку.

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

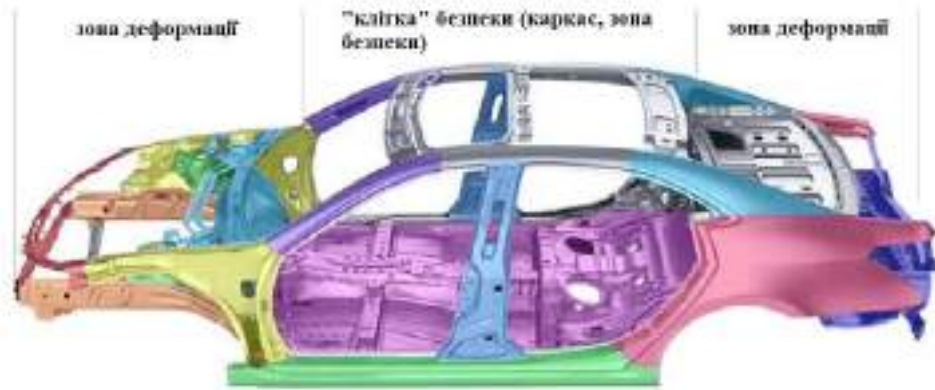


Рисунок 1.4 – Зони деформації та безпеки

У цьому випадку сила, що діє на весь кузов, частково поглинатиметься деформованими матеріалами. Затримка також буде меншою, тому що час, протягом якого зона деформації втиснута, як би сповільнює рух автомобіля. Таким чином, зіткнення максимально поглинається, що захищає пасажирів.

Усередині, де перебувають водій і пасажир, встановлено так звану «клітку» безпеки (каркас безпеки, зона безпеки). Матеріали в цій частині корпусу настільки міцні, що конструкція каркасу не деформується або практично не деформується у разі сильного зіткнення. Пасажири будуть максимально захищені від затискання у разі зіткнень та перекидання.

На рисунку 1.5 показаний краш-тест VW Touran, який показує, як зона деформації поглинає лобовий удар, а матеріал навколо пасажирів практично не деформується.



Рисунок 1.4 – Краш-тест VW Touran:

а – реальний; б – змодельований.

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

В автомобілях, які ще не мали каркасної конструкції, внутрішня частина кузова буде легко деформуватися. Приклад можна побачити на зображенні, де VW Transporter T3 проходить краш-тест.

#### 1.4 Матеріали для виготовлення кузовів.

Міцність і жорсткість конструкції можна збільшити за рахунок товщини сталі, але це позначиться на масі. Кузов має бути легким і водночас міцним. Це забезпечується за рахунок застосування низько вуглецевої листової сталі. Окремі деталі виготовляються штампуванням. Потім частини міцно з'єднуються один з одним точковим зварюванням.

Основна товщина сталі становить: 0,8-2 мм. Для рами застосовується сталь завтовшки: 2-4 мм [3]. Найбільш важливі деталі, такі як лонжерони та стійки, виготовляються зі сталі, найчастіше легованої, товщиною: 4-8 мм, великовантажні автомобілі: 5-12 мм.

Перевагою низько вуглецевої сталі є те, що вона добре піддається формуванню. Можна зробити деталь будь-якої форми та геометрії. Недолік полягає у низькій стійкості до корозії. Для підвищення стійкості до корозії листи сталі оцинковуються або додається мідь. Лакофарбове покриття також захищає від корозії.

Найменш важливі деталі, які не несуть основного навантаження, виготовляються із пластмас або сплавів алюмінію. Це знижує вагу та вартість конструкції. На рисунку 1.4 показано елементи кузова з розподілом по матеріалах в залежності від призначення.

Сучасні конструктори постійно шукають способи зниження маси без втрати жорсткості та міцності. Одним із перспективних матеріалів є алюміній.

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Наразі активно застосовується матеріал піноалюміній. Це дуже легкий і водночас твердий матеріал, який добре поглинає удар під час зіткнення. Піниста структура забезпечує високу термостійкість та шумоізоляцію. Недоліком даного матеріалу є його висока вартість, приблизно на 20% дорожче традиційних аналогів. Широко застосовують алюмінієві сплави концерни "Ауді" та "Мерседес". Наприклад, за рахунок таких сплавів вдалося значно зменшити масу кузова Ауді А8. Вона складає лише 810 кг. Її кузов представлений рисунку 1.5 [2].



Рисунок 1.4 – Матеріали виготовлення кузова.

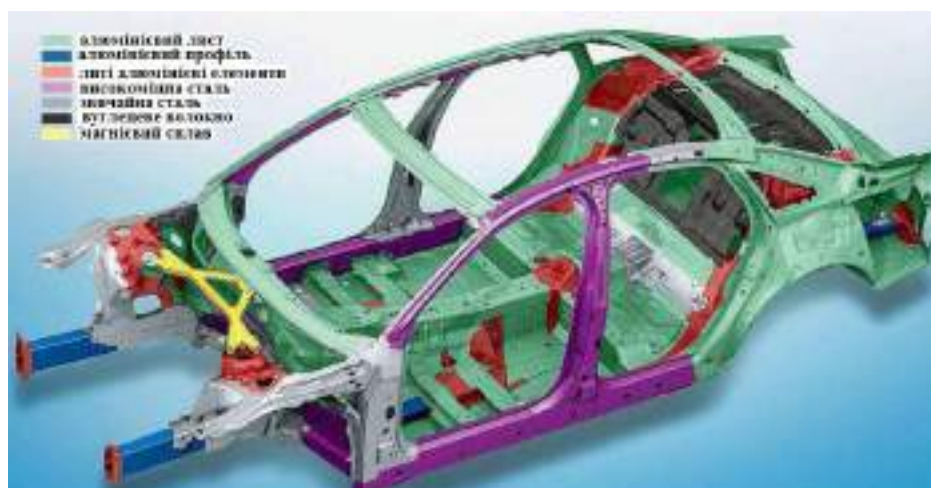


Рисунок 1.5 – Алюмінієвий кузов Audi A8

Кузов є одним із найважливіших конструктивних компонентів будь-якого автомобіля. Від нього багато в чому залежить маса, керованість та

										Арк.
										14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ					

безпека транспортного засобу. Якість та товщина матеріалів позначаються на довговічності та стійкості до корозії. Сучасні автовиробники все частіше застосовують вуглепластик чи алюміній, щоб знизити масу конструкції. Головне, щоб кузов зміг забезпечити максимально можливу безпеку для пасажирів та водія у разі зіткнення.

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

## 2 БЕЗПЕКА ТА МІЦНІСТЬ КУЗОВНИХ КОНСТРУКЦІЙ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.

### 2.1 Аналіз пошкоджень кузовних конструкцій автотранспортних засобів.

Від травм усередині автомобіля гинуть від 10 до 20% людей від загальної кількості загиблих при автомобільних травмах. Можна виділити чотири варіанти [4]:

- пряме зіткнення з переду;
- бічне;
- зіткнення під час удару ззаду;
- перекидання (перекидання) машини, які відбуваються внаслідок зіткнення спереду, збоку, ззаду або в результаті «занесення» автомобіля.

До сьогодні при проектуванні автомобілів найбільше зусиль і часу витрачається на розробку силової структури кузова. При зіткненнях з переду та ззаду на невеликих швидкостях основне навантаження приймають він так звані краш-бокси – елементи із запрограмованою деформацією. Вони стискаються, як гармошка, не пропускаючи енергію удару далі. Якщо ж удар сильніший, то навантаження розподіляється за всіма силовими елементами (рис. 2.1): лонжеронами, підрамниками, стійками даху тощо. Уся структура у разі зіткнення має працювати як єдине ціле .

Автомобілі найкраще захищені з переду: з-поміж небезпечних ДТП більшість фронтальні, а на другому місці - удари з заду. Але від таких ударів і захиститися легше, адже з переду і з заду можна розмістити досить потужні зони, що зминаються. А ось убезпечити пасажирів від ударів збоку набагато складніше. Всередину дверей вбудовують міцні бруси безпеки, а центральну стійку та пороги проектують таким чином, щоб енергія удару перетікала на поперечні підсилювачі підлоги та дах (рис. 2.2).

									Арк.
									16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ				



Рисунок 2.1 – Розподіл енергії удару при прямому зіткненні.



Рисунок 2.2 – Розподіл енергії удару при бічному зіткненні.

Всі транспортні засоби різною мірою схильні до перекидання. Як правило, тенденція до перекидання збільшується зі збільшенням висоти центру мас, вузькістю колії осі, чутливістю кермового управління та збільшенням швидкості.

Поріг перекидання легкових автомобілів становить понад 1 g поперечного прискорення. Модель Tesla Model S має надзвичайно низький ризик перекидання - 5,7% через його низький центр мас. Легкі вантажівки перекинуться при бічному прискоренні від 0,8 до 1,2 g. Великі комерційні вантажівки будуть котитися з бічним прискоренням всього 0,2 g. Імовірність

										Арк.
										17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ					

перекидання вантажівок вище, ніж у легкових автомобілів, оскільки вони зазвичай мають вищі кузови та більший кліренс. Це піднімає центр мас.

При перекиданні автомобіля (рисунок 2.3) травми та смертність нижчі, ніж при лобових чи бічних зіткненнях, за умови, що людина не вилетить із машини, та що машина не налетить на дерево чи стовп. Висновок з тестів, виконаних німецькою організацією ADAC [4]: незважаючи на рівень пасивного захисту, що значно покращився, ризик травм у пасажирів кабріолетів значно вищий, ніж у автомобілі з жорстким дахом. Тому основні рекомендації такі: якомога нижче опускати сидіння і стежити за максимально щільним натягом ременів безпеки.



Рисунок 2.3 – Перекидання автомобіля

Імовірність смертельних випадків залежить певною мірою від розміру та типу автомобіля. Маленький автомобіль менш здатний абсорбувати енергію зіткнення. Тому тяжкі ушкодження та смертельні випадки частіше трапляються з такими машинами. Вантажні машини зазвичай важчі, тому у разі зіткнення з іншою машиною у тих, хто перебуває у важчій, шансів вижити більше. Однак спортивні машини частіше, ніж легкові, потрапляють у катастрофи зі смертельними наслідками, так само легко перевертаються.

Перекидання (перевороти) становлять приблизно 18% від усіх смертних випадків в аваріях. Для легкових автомобілів напрям удару найчастіше в лоб, перевороти становлять 15% всіх смертельних випадків в аваріях. Навпаки, цифри для важчого транспорту — загальна кількість переворотів 36% від усіх

										Арк.
										18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ					

аварій, для пікапів — 24,5%, фургонів — 20,3% і важких вантажних автомобілів — 13,8%.

Найчастіше перевертаються машини, що з'їхали з дороги при різкій спробі повернути її назад. При достатньому русі вбік шини ковзають поверхнею, і машина перекинеться; якщо руху недостатньо, вона знову впаде на колеса і не перекинеться. Перекинеться машина чи ні, залежить не тільки від бічного руху, а й від висоти її центру тяжіння, а також від дороги. Машина швидше перевернеться на ґрунтовій дорозі, ніж на асфальті.

При низько розташованому центрі тяжкості, як у легкових машинах, машина, що перевертається, зупиниться на краю даху, протилежному тій стороні, в яку почала перевертатися. У машинах з високо розташованим центром тяжіння (вантажних) удар швидше припаде на провідний край даху. Після удару машина продовжує перевертатись, часто зупиняючись на колесах.

При перекиданні зазвичай машина перевертається не більше одного разу. Оглядаючи місце та машину, той, хто реконструює обставини нещасного випадку, може визначити швидкість під час перекидання, скільки разів машина перекинулася, місця ударів та напрямок перевороту.

## 2.2 Аналіз існуючих систем та технологій перевірки міцності кузовів автомобілів.

### 2.2.1 Тест на міцність даху IIHS.

Американський інститут Insurance Institute for Highway Safety (IIHS) не перевіряє стійкість машини та схильність до перевороту – перевіряється лише міцність даху. Фахівці інституту наголошують, що це має визначальне значення - надто слабкі стійки даху гарантують пасажирам при перевороті машини контакт із самим дахом та пошкодження голови, шиї тощо (рисунок

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

2.4). Крім того, при суттєвій деформації даху, у машини вилітають шибки, відчиняються двері, через що пасажирів, особливо не пристебнутих ременями безпеки, можуть вилетіти з салону [5].



Рисунок 2.4 – Слабкі стійки даху та пошкодження голови водія

Випробування на міцність даху машини відрізняється від лобових та бічних краш - тестів. Інститут "ІІНІС " використовує для цього спеціальний стенд, де перевіряється міцність даху, показаний на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Стенд перевірки міцності даху

Спеціальний прес починає стискати дах автомобіля доти, доки він не деформується на 12 сантиметрів. Це зусилля, яке виявляється на даху автомобіля від початку випробування постійно зростає і збільшується. Таким чином, фахівці інституту обчислюють коефіцієнт міцності даху машини, відбувається це за рахунок співвідношення ваги до міцності.

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Чим міцніший дах автомобіля, тим встановленню потрібно відповідно більше ваги та сили, щоб здеформувати дах. З отриманих результатів виставляються остаточні підсумкові оцінки. Ті автомобілі, які отримують оцінку "добре", мають співвідношення міцності "4" - до ваги. Це означає, що такий дах машини може витримати чотири свої власні ваги, перш ніж її дах деформується на 12 сантиметрів. Оцінка "прийнятно" зазвичай присуджується автомобілям із співвідношенням міцності до ваги - "3,25". Оцінка "нижче середнього" присуджується машинам із співвідношенням "2,5" - до ваги. Оцінка "погано" присвоюється автомобілям із співвідношенням міцності до такої ваги, все менше коефіцієнта "2,5".

### 2.2.2 Система випробування міцності даху ВІА.

Випробування міцності даху та дверей FMVSS 214, 216 та аналогічні стандарти представлені на рисунку 2.6.

Система ВІА [5] перевірки міцності даху та дверей при аварійному зіткненні забезпечує високу керованість та точність вимірювань, а також збирання даних на сучасному технічному рівні. Система ВІА простіше та коректніше визначає міцність конструкції.



Рисунок 2.6 – Випробування міцності даху та дверей

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

Один і той же випробувальний стенд ВІА здійснює змінання і даху, і дверей. Унікальний дизайн з кутом нахилу, що безперервно змінюється, дозволяє виконувати змінання даху у вертикальному напрямку.

В таблиці 2.1 наведено робочі характеристики вимірів суттєвих параметрів цієї системи.

- 4 тривісні тензодатчики для визначення точки застосування навантаження. Точність вимірювання сили після програмного оброблення сигналу: 0,5 %.

- Магнітострикційний датчик положення для виміру абсолютного переміщення.

Таблиця 2.1 – Робочі характеристики вимірюваних параметрів.

Найменування	Показники
Діапазон кутів при роздавлюванні даху, °	0-40
Кут нахилу штовхача, °	±20
Кут змінання дверей, °	90
Максимальний робочий хід, м	1
Максимальна висота автомобіля, м	2,1
Максимальне навантаження, кН	250

### 2.3 Аналіз методів розрахунку несучих властивостей конструкцій.

Підвищення пасивної безпеки та міцності кузовних конструкцій автотранспортних засобів при забезпеченні заданої довговічності та металоємності є однією з важливих проблем автомобільної галузі. Вирішення проблеми багато в чому визначається подальшим удосконаленням процесів проектування, доведення, сертифікації кабін і кузовів автомобілів, автобусів. Велике значення при цьому має розвиток методів оцінки несучих властивостей конструкцій. Найбільш широке застосування з них знайшов експериментальний метод, заснований на результатах натурних стендових або полігонних випробувань повномасштабних конструкцій окремо або в

складі всього автомобіля (автобуса). Цей метод має незаперечну перевагу за достовірністю одержуваних результатів. Однак порівняно висока трудомісткість і вартість експериментальних робіт обмежує його можливості на етапі доведення при пошуку раціональної конструкції, коли потрібно розгляд великої кількості варіантів розроблюваної конструкції, а також при оцінці безпеки конструкції в різних аварійних ситуаціях. Це з проведенням випробувань великої кількості дорогих дослідних зразків. Через відсутність такої можливості, особливо в даний час, часто необхідна для цього програма випробувань зводиться до проведення мінімального обсягу робіт, пов'язаного зі стендовими випробуваннями одного або двох зразків конструкції та з сертифікацією автомобіля. В останньому випадку випробуванням піддається, як правило, один автомобіль. Але і це в даний час під силу не кожному заводу, особливо якщо йдеться про сертифікацію міського або туристичного автобуса, що має високу споживчу вартість. Все це вказує на необхідність подальшого вдосконалення розрахункових методів оцінки безпеки та міцності кузовів, кабін, застосування системного підходу, що базується на комплексній оцінці несучої здатності конструкцій на всіх етапах проектування, доведення, сертифікації з використанням розрахункових та експериментальних методів оцінки.

Розрахункова оцінка несучої здатності кузовних конструкцій заснована на застосуванні методу розрахунку на певному етапі аналізу працездатності конструкції при вирішенні конкретної практичної задачі.

В залежності від застосовуваного методу розрахунку та використовуваної моделі конструкції процедура проведення розрахункової оцінки може видозмінюватися. При цьому загальною завжди залишається структура виконання розрахункової оцінки безпеки та міцності, яка включає наступні основні етапи [6]:

- 1) Структурний аналіз реальної і проектної конструкції, її силової схеми.

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

2) Аналіз режимів і видів навантаження, способів прикладання навантаження і зовнішнього закріплення конструкції.

3) Вибір і розробка розрахункової моделі і матеріалу;

3.1) формування структури вузлів і елементів, внутрішніх і зовнішніх граничних умов, зовнішнє навантаження;

3.2) присвоєння фізичних характеристик елементів і матеріалу;

3.3) присвоєння координат (або автоматичне формування) вузлових точок і топології елементів;

3.4) присвоєння зовнішніх опор та навантаження, внутрішніх зв'язків між елементами;

3.5) перевірка бази даних, налагодження та коригування моделі у певному режимі навантаження.

4. Розрахунок моделі за обраним алгоритмом

5. Обробка та аналіз результатів розрахунку.

6. Розгляд інших видів навантаження та умов деформування конструкції залежно від розв'язуваних завдань. та міцності конструкції.

7. Систематизація даних і визначення конкретних величин деформування конструкції.

8. Оцінка безпеки і міцності конструкції.

Кожен з них включає певну процедуру виконання операцій. На першому етапі проводиться синтез конструкції з точки зору з'ясування функціональної необхідності окремих частин і елементів, їх впливу на безпеку та міцність. Оцінюються конструктивні перерізи елементів, способи їх з'єднання між собою, особливості зварювання, наявність або відсутність каркасу, стрижневих елементів. Виділяється сукупність елементів, що визначає силову схему конструкції. На другому етапі уточнюються умови оцінки безпеки та несучої здатності конструкції відповідно до вимог і нормативних документів. Залежно від цього вибираються режими навантаження (прикладання зовнішнього навантаження: вигин, кручення або аварійне

									Арк.
									24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ				

навантаження), спосіб застосування навантаження (зосереджена, розподілена або інерційна), вид навантаження (статичний або динамічний). Від характеру навантаження, умов закріплення конструкції залежить і спосіб розміщення зовнішніх опор моделі, їх кількість. Третій етап має специфіку в залежності від обраної моделі. Розрахункові моделі бувають прості, уточнені та докладні. Прості складаються із стрижневих елементів, що представляють силову схему конструкції або окремих її частин. Уточнена модель включає стрижневі і пластинчасті елементи. У цьому випадку вона називається комбінованою. Уточнені моделі залежать від ступеня наближення моделі до реальної конструкції. Детальна модель складається тільки з пластинчастих елементів і максимально враховує особливості реальної конструкції. Зміст та обсяг третього етапу залежать також від застосовуваного методу розрахунку.

Операції, наведені в пунктах 3.1 – 3.5, характерні для методу кінцевих елементів. На четвертому етапі виконується розрахунок моделі за умовами безпеки або міцності в залежності від розв'язуваної задачі.

Обсяг п'ятого етапу залежить від складності розв'язуваної задачі, застосовуваного методу розрахунку і використовуваного пакета програм. Багато сучасних пакетів програм міцнісного розрахунку не мають процедур сортування і систематизації результатів розрахунку в графічному і схематичному вигляді, зручному для аналізу та оцінки досліджуваних характеристик. У цьому випадку потрібно застосування спеціальних програм, що дозволяють використовувати можливості AutoCAD для отримання картини розподілу максимальних напружень в елементах моделі, і електронних таблиць MSExcel для побудови графіків середньозважених значень напружень в основних силових перерізах конструкції.

На сьомому етапі проводиться систематизація даних, визначаються критерії оцінки безпеки і міцності для всіх нормованих випадків навантаження конструкції, з урахуванням різних факторів впливу на них.

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Восьмий етап, завершальний. На ньому дається остаточна оцінка безпеки та міцності конструкції за умовами, розглянутими вище. У разі недотримання умов і невідповідності конструкції вимогам проводиться пошук раціональної силової схеми за рахунок внесення певних змін. При цьому цикл повторюється.

Загальна структурна схема вирішення розрахункової задачі з оцінки безпеки та міцності наведена в додатку А. Прийняті позначення відповідають узагальненим параметрам конструкції:  $F$ ,  $I$ ,  $W$  – геометричні характеристики стрижневих елементів ( $F$  – площі перерізів,  $I$ ,  $W$  – моменти інерції та моменти опору перетинів),  $z$  – переміщення та деформації вузлів моделі,  $N$ ,  $M$  – внутрішні зусилля,  $\sigma$  – напруження в елементах, включаючи і еквівалентні,  $F_r$  – руйнуючі навантаження. Ці параметри наведено для прикладу. Сучасні розрахункові методи дозволяють отримувати та аналізувати всі розглянуті критерії оцінки міцності та безпеки. Використані пакети програм мають необхідну графічну підтримку, що дозволяє переглядати результати розрахунків як у стрижневих, так і по пластинчатим елементам.

2.4 Підходи до оцінки характеристик кузовів автомобіля на основі віртуального випробувального стенду.

Тепер стало можливим використовувати цифрові двійники для визначення характеристик несучої системи автомобіля. Цифрові близнюки – це комп’ютерна модель, яка побудована на основі математичної моделі що відображає особливості створюваного об’єкта, які цікавлять проектувальника або тестер. Такі математичні моделі повинні бути забезпечені відповідними засобами чисельних розрахунків, щоб їх можна було використовувати для отримання адекватних результатів оцінювання.

									Арк.
									26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ				

Саме тестування проводиться на віртуальних стендах. Якщо доповнити комп'ютерну модель, яка обчислює лише певні параметри, з додатковими алгоритмами перевірки моделі за різних вихідних даних і умов, то ми отримаємо віртуальний стенд. Набіри віртуальних тестових стендів різної функціональності можуть становити цифрову платформу, яка використовується для проектування, випробування та різного роду сертифікації [7].

Якщо оснастити цифровий двійник додатковими алгоритмами оптимізації [7], то можна отримати переваги використання віртуального випробувального стенду та цифрових платформ. Це, наприклад, методи топологічної оптимізації будови тіла, методи оптимізації розподілу ребер жорсткості, і, навпаки, методи створення полегшених конструкції без втрати жорсткості та міцності.

Загальна концепція цифрового двійника проєктованого продукту.

Визначення характеристик кузова автомобіля дозволяє конструктору оцінити його жорсткість і міцність. Ці характеристики дають можливість оцінити пасивну безпеку автомобіля.

Ця оцінка є одним з найважливіших показників транспортного об'єкта.

Цифровий двійник кузова автомобіля - це, перш за все, визначення загальної конструкції кузова, її конструктивні особливості з урахуванням використовуваних матеріалів (рис. 2.7).

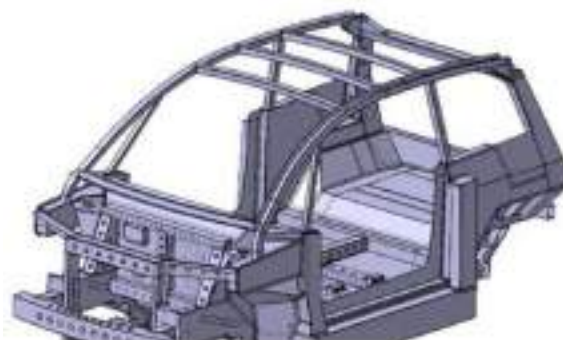


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд кузова автомобіля та його конструктивних елементів.

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Оскільки цікавить цифровий двійник усього транспортного засобу, він також має представляти всі інші системи автомобіля. Перш за все, це двійники внутрішніх систем, таких як електрообладнання, гальмівна система, тощо (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Цифровий двійник внутрішніх систем автомобіля.

Повнота представлення всіх систем і елементів реального автомобіля в цифровому вигляді близнюка необхідно для можливості реалізації комплексного підходу в його проектуванні та тестуванні. Це також необхідно для оцінки взаємодії елементів кузова з іншими системами і водія [7].

Наприклад, у цифровому двійнику автомобіля стало можливим оцінити оптимальні параметри розташування накопичувачів енергії та їх взаємодії з кузовом автомобіля в краш-тестах.

Усі ці міркування необхідно враховувати при розробці віртуальних випробувальних стендів, і це призводить до необхідності розробки багатьох складних математичних і комп'ютерних моделей.

Ці моделі повинні дозволяти оцінювати їх характеристики, оцінювати взаємодію різних моделей одна з одною, що дозволяє тестувати та оптимізувати умови за даної симуляції.

Цифровий двійник для оцінки параметрів кузова автомобіля.

Розроблено цифровий двійник, який дозволяє оцінювати механічну жорсткість і міцність конструкції кузова автомобіля (рис. 2.9).

									Арк.
									28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ				

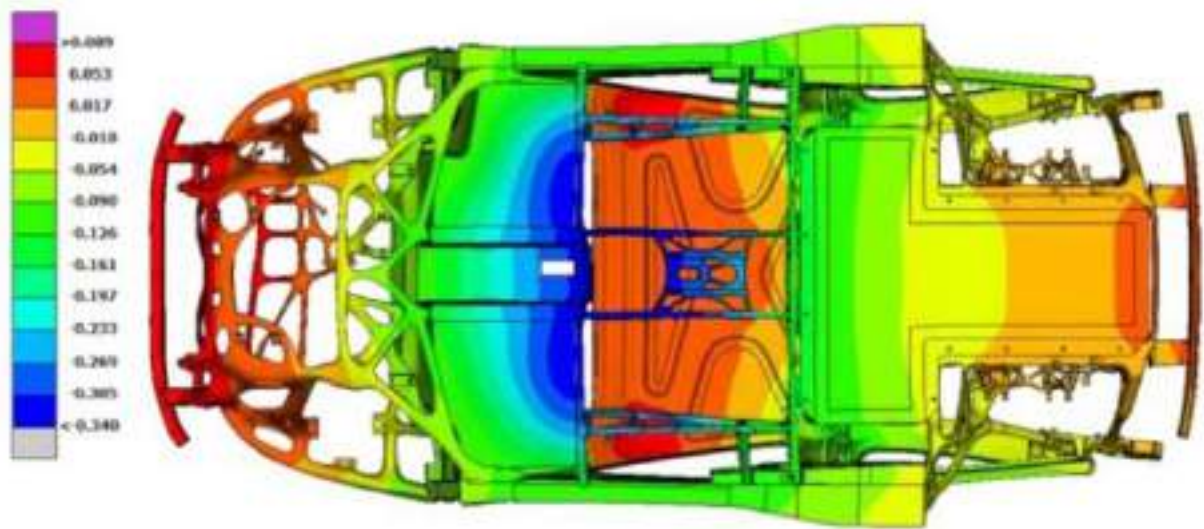


Рисунок 2.9 – Результати аналізу жорсткості та міцності кузова автомобіля, отримані на віртуальному двійнику.

Цифровий двійник базується на математичній моделі, яка враховує механічну характеристику проєктованого органу. За ним оцінюють характеристики математичної моделі і кінцево-елементну модель 3D CAD автомобіля. Точність оцінок, отриманих за розробленою моделлю, визначається точністю математичних моделей, достатньо хороша деталізація кінцево-елементної моделі та комп'ютерних чисельних розрахунків [8].

Це надзвичайно складна система, яка дозволяє значно скоротити витрати часу, а також істотно знизити економічні витрати на проведення відповідних випробувань на етапі проєктування та сертифікації автомобіля.

Для оцінки міцності та жорсткості слід використовувати цифровий двійник та віртуальний випробувальний стенд не тільки однорідних конструкцій, а й багатоеlementних інженерних рішень. Наприклад, надзвичайно важливо вміти моделювати особливості тіла, беручи до уваги місця кріплення його елементів. Необхідно враховувати наявність місць зварювання, клепок або заклеювання.

Розроблений додаток має багатий функціонал графічного інтерфейсу. Така складна система у вигляді віртуального випробувального стенду

										Арк.
										29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ					

повинна надавати можливість аналізувати та оцінювати всі критичні параметри розробленого продукту. Перш за все, для цього потрібні відповідні засоби візуалізації результатів моделювання. Звичайно, оптимальну комп'ютерну систему повинна забезпечувати автоматизація деяких завдань оцінки параметрів транспортного засобу, що проектується.

На сьогодні автоматизація пошуку оптимальної топології різних механічних систем стає важливою інженерно-математичною проблемою.

Розглянемо деякі характеристики кузова спроектованого автомобіля, які можна оцінити на віртуальних стендах цифрової платформи. Нижче наведено деякі результати, отримані на поточному програмному забезпеченні зробленого в НТІ (Політехнічний університет).

Приклади отримання характеристик на віртуальних стендах для автомобілів.

Механічна жорсткість і міцність розробленого продукту безпосередньо пов'язані з такими характеристиками, як безпека автомобіля для водія і пасажирів при зіткненні з перешкодою [2]. Випробування на безпеку різних видів лобових зіткнень, бічних зіткнень ззаду або фронтальних. Крім того, необхідно провести перевірку безпеки на удари по даху автомобіля. Останній сценарій також важливий для моделювання ситуацій перекидання.

На рисунку 2.10 зображено віртуальний краш-тестовий стенд для оцінки безпеки водія та пасажирів, що імітує лобовий удар об ліву передню частину автомобіля. Проводиться оцінка ступеня деформації та загроза травмування водія або переднього пасажирів.

Не менш важливим і необхідним є вміння оцінити наслідки бічного удару [2]. Візуалізація краш-тесту, отримана на віртуальному стенді, показана на рисунку 2.11.

На рисунку 2.11 імітується подія бічного зіткнення для спроектованого електромобіля. У цьому віртуальному тесті дизайнер може оцінити наслідки бокового удару для акумуляторів автомобіля. Як відомо, сучасні батареї

									Арк.
									30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ				

мають властивість самозайматися при сильних ударах. Так як вони, як правило, заповнюють простір під водієм і пасажирами. Така оцінка надзвичайно важлива з точки зору оцінки ступеня безпеки транспортного засобу, що проектується.

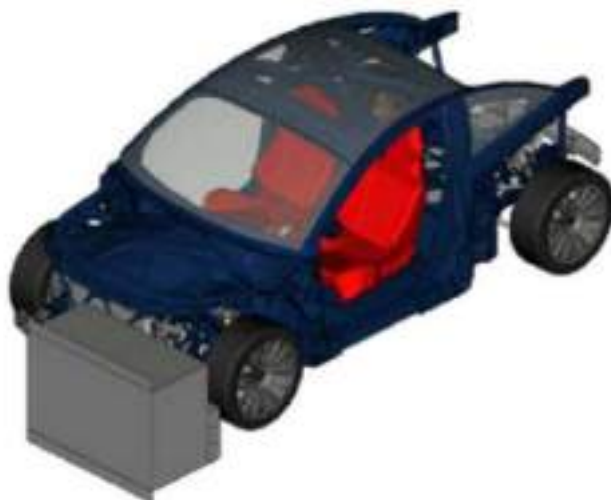


Рисунок 2.10 – Приклад візуалізації краш-тесту на віртуальному стенді.

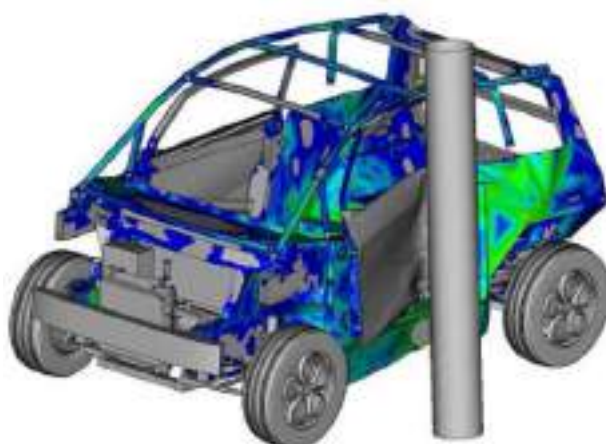


Рисунок 2.11 – Візуалізація результатів симуляції краш-тесту, де оцінюється бічний удар

Ряд інших важливих симуляцій можна виконати за допомогою віртуальних випробувальних стендів. Це оцінка забруднення зовнішньої частини автомобіля, оцінка стійкості кузова автомобіля та дренажу. Оцінка рівня акустичного шуму в салоні автомобіля, інтер'єру також залежать від конструктивних особливостей кузова автомобіля і використовуваних інтер'єрних рішень.

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

При оцінці рівня шуму важливо враховувати вплив підвіски на кузов автомобіля.

Для оцінки рівня шуму сьогодні розроблено віртуальні випробувальні стенди, в яких реалізований цифровий двійник альфа-камери.

Сучасні досягнення в області математичного моделювання, кінцево-елементних моделей, високої продуктивності обчислювальної техніки зробили можливим моделювання надзвичайно складних технічних систем і комплексів. Цифрові близнюки, побудовані на основі цих технологій, змінили багато підходів до інженерних розрахунків, а також до проектування та сертифікації.

Однією з найважливіших проблем у проектуванні транспортних засобів завжди була проблема оцінки характеристик властивостей кузова автомобіля. Такі оцінки вимагають складного математичного моделювання. Рішення задач математичного моделювання включає необхідність забезпечення збіжності рішень, їх стійкості.

На сьогоднішній день такі системи реалізовані і дозволяють проводити оцінки з заданою точністю. Приклади результатів комп'ютерного моделювання на основі цифрової моделі автомобіля показують, що сучасні цифрові промислові технології дозволяють творити комплексні цифрові платформи з повним циклом розробки технічних продуктів.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на системи автоматичної оптимізації проєктованих рішень. У таких системах параметри створюваного продукту задаються через певні інтервали, задається функція витрат, а проєктні рішення оптимізуються для досягнення заданих параметрів при мінімізації (або максимізації) заданої функції вартості.

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5 Дослідження жорсткості та міцності несучої системи автомобіля на спрощених моделях методами кінцевих елементів.

### 2.5.1 Проста модель структурної поверхні (SSSM).

Метод простих структурних поверхонь (SSS) був вперше представлений Павловським (1969) і був доведений як хороший метод на концептуальній стадії процесу проектування або коли є фундаментальні структурні зміни [6].

Процедура полягає в тому, щоб змоделювати або представити структуру автомобіля у вигляді кількох плоских поверхонь. Кожна плоска поверхня або проста структурна поверхня (SSS) повинна утримуватися в рівновазі серією сил. Ці сили є результатом ваги різних компонентів, прикріплених до них, наприклад, вага двигуна/трансмісії застосовує силу до поздовжніх і бічних рейок двигуна. Проста структурна поверхня (SSS) — це плоский структурний елемент або вузол, який можна вважати жорстким лише у власній площині

### 2.5.2 Модель на основі балки для однієї сторони автомобіля (BMOS).

Ця модель чимось схожа на SSSM за геометрією; однак є дві фундаментальні зміни: 1) до моделювання додано поверхню чверті панелі з урахуванням більшої кількості геометричних деталей, і 2) модель є тривимірною. Слід зазначити, що через складність геометрії четвертої панелі спрощення цієї панелі до балкових елементів у SSSM збільшує відсоток помилок. Для більш реалістичного моделювання з'єднання між С-стійкою та рейкою коромисла два кінці рейлінга даху та рейлінга коромисла з'єднані відповідно з верхнім і нижнім кінцями чверті панелі. У порівнянні з SSSM, ця модель в основному досліджує роль розгляду моделювання поверхні чверті панелі та нового тривимірного простору моделювання [6].

									Арк.
									33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ				

### 2.5.3 Модель на балці для всього кузова автомобіля (ВМЕС).

У цій моделі основні елементи конструкції ВІВ спрощено до балок. У вигляді балок тонкостінного прямокутного перерізу додані бічні поперечини, а також поздовжня тунельна рейка автомобіля. Основна увага цієї моделі зосереджена на ефекті додаткового зміцнення бічних елементів; також вплив бічних суглобових зв'язків. На рисунку 2.12 показані з'єднання моделі та конфігурація геометрії. Розглянуто 4 гнучкі шарнірні з'єднання, в яких обмежені всі DOF, крім обертання по осях  $x$ ,  $y$  і  $z$ . [6, 9]

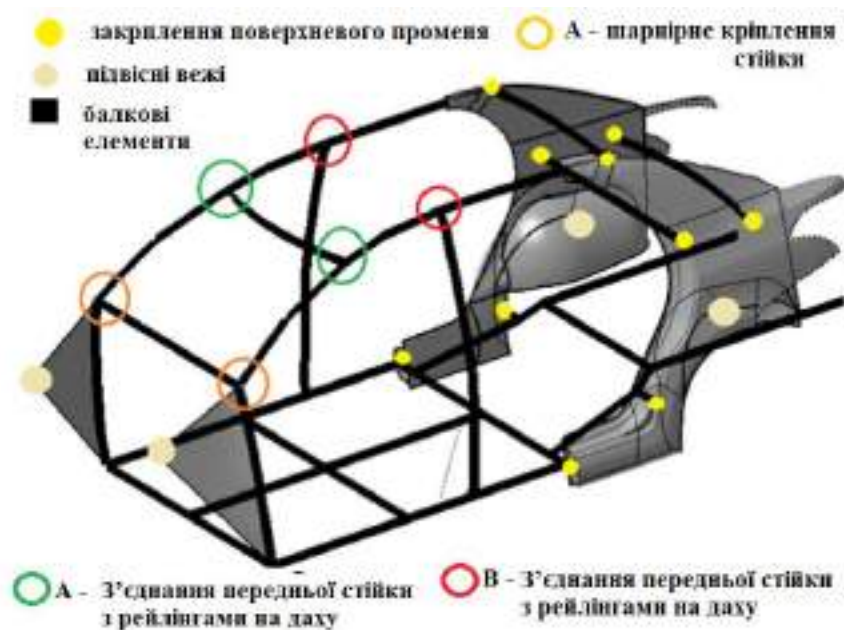


Рисунок 2.12 – Конфігурація з'єднань і геометрії моделі ВМЕС.

### 2.5.4 Модель пов'язаної поверхні променя (CBSM) [10].

У CBSM були досліджені ефекти двох важливих модифікацій, по-перше, вплив більш детального поверхневого моделювання замість спрощення балки, по-друге, характер взаємодії між балками та поверхнями в моделюванні FE. Крім того, опорну петлю було з'єднано з верхніми рейками, як показано на рисунку 2.13. Для моделювання гнучкості з'єднань між

петлею та верхніми рейками, з'єднаний вузол може обертатися лише вздовж тривимірних осей.

Критерії скінчноелементного моделювання. Комерційне програмне забезпечення ABAQUS використовувалося для моделювання FE. Усі моделювання проводились у неявному режимі. Розмір вічка сітки було встановлено на 20 мм. Стиль сітки вважався вдосконаленим двовимірним квадратно-трикутним типом, який підходить для поверхневої сітки. Конститутивний матеріал розглядався як сталь із модулем зсуву та модулем пружності 79,3 ГПа та 207 ГПа відповідно. Для моделювання гнучких з'єднань також використовували з'єднання Ейлера.

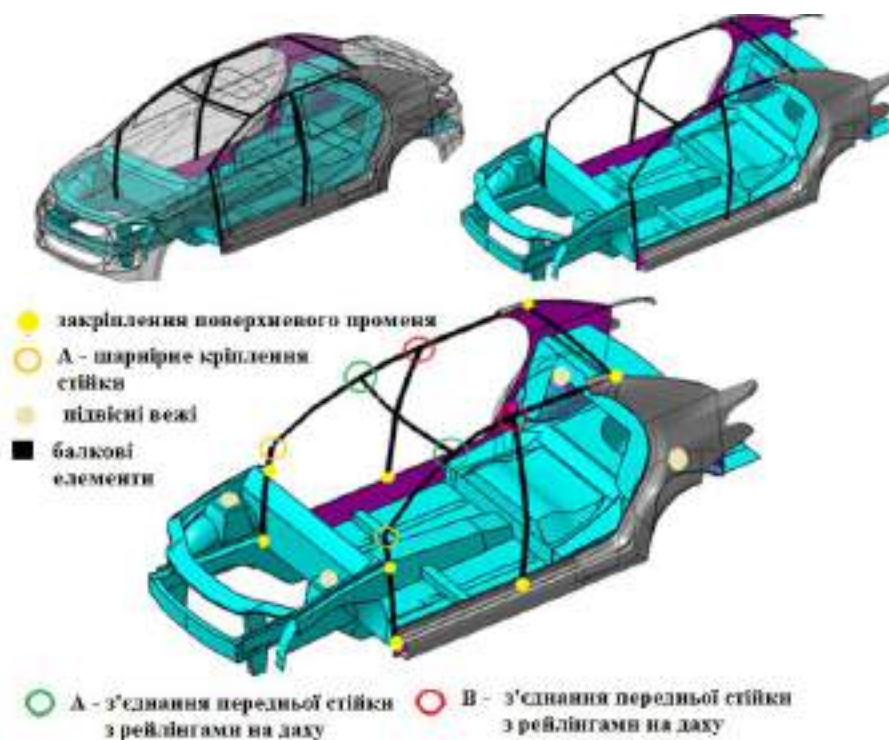


Рисунок 2.13 – З'єднання та конфігурація геометрії BMES.

### 2.5.5 Аналіз жорсткості на вигин.

Методологія, застосована в специфікації граничних умов, базується на фактичних промислових випробуваннях. Незважаючи на різницю в природі представлених моделей, до розрахунку як крутильної, так і вигинальної

жорсткості в усіх них було використано ідентичний підхід, який обговорюється далі.

Граничні умови при згинальному навантаженні. Граничні умови в аналізі вигину зображено на рис. 2.14. Усі моделі були закріплені на опорах передньої та задньої підвіски, а кріплення передньої підвіски були спрощені у вигляді жорстких пластин. У моделі SSSM башти задньої та передньої підвісок були спрощені до одного вузла з фіксованими поступальними DOF. У VMOS, VMES і CBSM були виправлені поступальні DOF 25 вузлів у кожній передній і задній опорах підвіски. Слід зазначити, що ці вузли розподілені однорідно, охоплюючи межу підвісної вежі з верхньою частиною ВІВ. У VMOS асиметричні DOF були визначені для всіх елементів моделі. Ця функція обмежує деформацію моделі виключно площиною  $x - z$ . Для розрахунку жорсткості на вигин конструкції моделі в SSSM і VMOS, зосереджена сила застосовується там, де В-стійка прикріплена до коромисла. Подібним чином у VMES і CBSM лінійне навантаження та навантаження тиску застосовуються до бічного ребра жорсткості відповідно.

Розрахунок жорсткості на вигин. Згодом вимірюється зміщення вздовж прикладеного навантаження, а жорсткість розраховується за таким співвідношенням [11]:

$$K_b = \frac{F}{\Delta}, \quad (2.1)$$

де  $F$  - загальна вертикальна сила, що призводить до згинального моменту, а  $\Delta$  - максимальне зміщення вздовж напрямку сили в коромислі. Слід зазначити, що  $F$  у рівнянні (2.1) мають загальне значення. Насправді, коли ми прикладаємо зосереджену силу  $f$  до кожної бічної панелі в SSSM і VMOS,  $F = 2f$ , у випадку лінійного навантаження  $f_l$  в CBSM,  $F = f_l L$  і, нарешті, для тиску  $p$  в VMES,  $F = pA$ , де  $A$  — поверхня на яку здійснюється тиск. Може спасти на думку, чому подібна зосереджена сила, як у SSSM або VMOS, не була врахована в 3D-моделях. Для цього існують дві основні

									Арк.
									36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ				



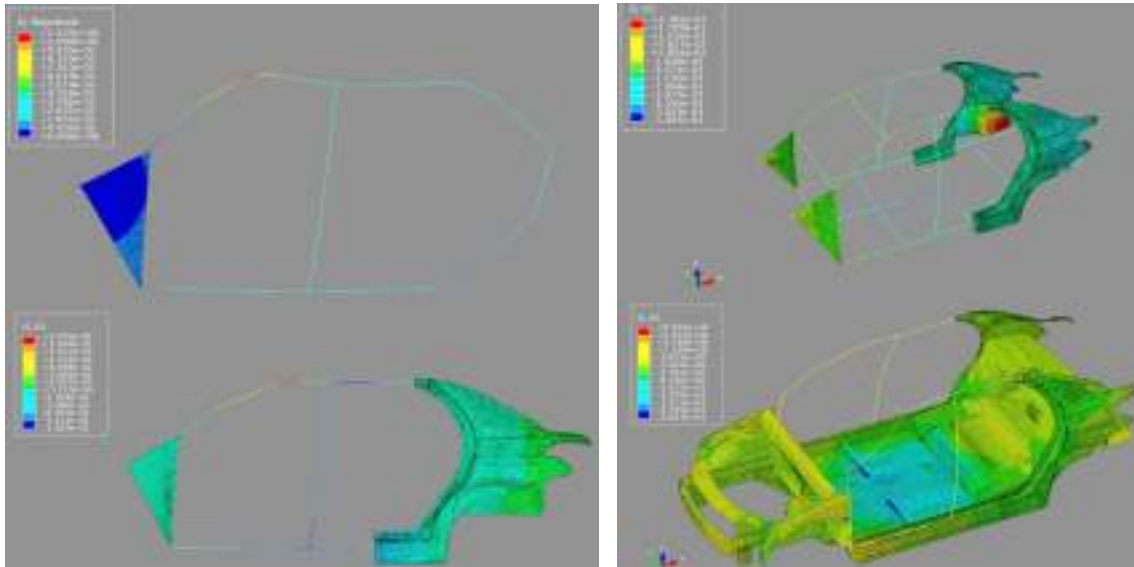


Рисунок 2.15 – Деформація моделей під навантаженням на згин.

### 2.5.6 Аналіз жорсткості на кручення.

Дослідження жорсткості на кручення в SSSM порівняно з іншими моделями відбувається за іншою процедурою. У BMOS, VMES і CBSM через складність геометрії дослідження жорсткості на кручення ґрунтується виключно на чисельному моделюванні [11]. Однак розрахунок жорсткості на кручення в SSSM потребує поєднання як аналітичного, так і чисельного аналізів. Нижче представлено теоретичний підхід для розрахунку жорсткості на кручення з урахуванням теорії SSS.

Аналіз жорсткості на кручення в SSSM.

Набуття жорсткості на кручення у спрощеному кузові транспортного засобу типу SSS можна коротко підсумувати в 3 етапи:

1- Усі панелі BIW спрощено до елементів SSS, і припускається, що крутний момент  $T$  застосовується до панелі приладів (див. рис. 2.16). Для кожної панелі розглядається статична рівновага, відповідно виводяться відповідні рівняння. Ці рівняння забезпечують матрицю у вигляді [11]:

										Арк.
										38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ					



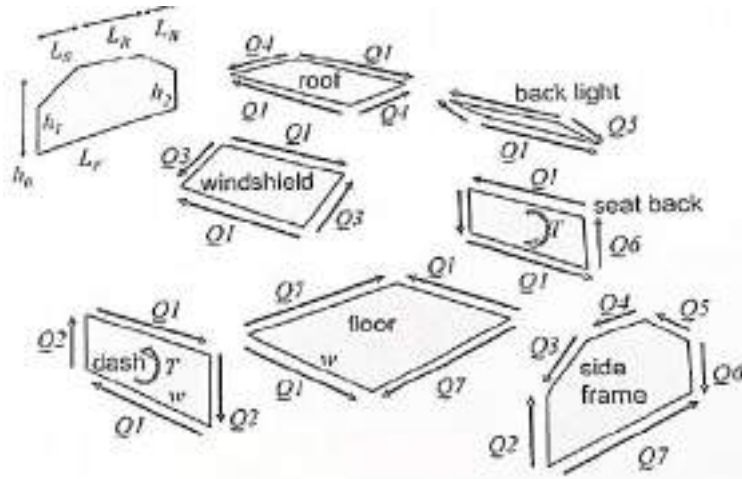


Рисунок 2.17 – Сили зсуву, що діють між панелями

2- Ефективний модуль зсуву бічної панелі також розраховується за:

$$(G_t)_{eff} = \left(\frac{F}{\delta}\right)\left(\frac{H}{L}\right) \quad (2.3)$$

де  $F$  — прикладена сила зрізу на рейлінги даху,  $\delta$  — прогин кабіни вздовж напрямку  $F$ , а  $H$  і  $L$  — висота та довжина колісної бази відповідно. Граничні умови схематично зображені на рисунку 2.18. Прикладений крутний момент  $T$  і параметр  $HL$  становлять 1000 Нмм і 0,66 відповідно. На рисунку 2.19 показано деформацію моделі FE під  $F = 994$  Н. У результаті було досягнуто  $(G_t)_{eff} = 547$  Н/мм.

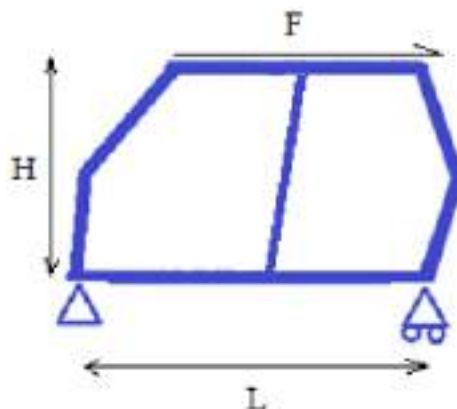


Рисунок 2.18 – Граничні умови при розрахунку ефективного модуля зсуву ВІВ [12].

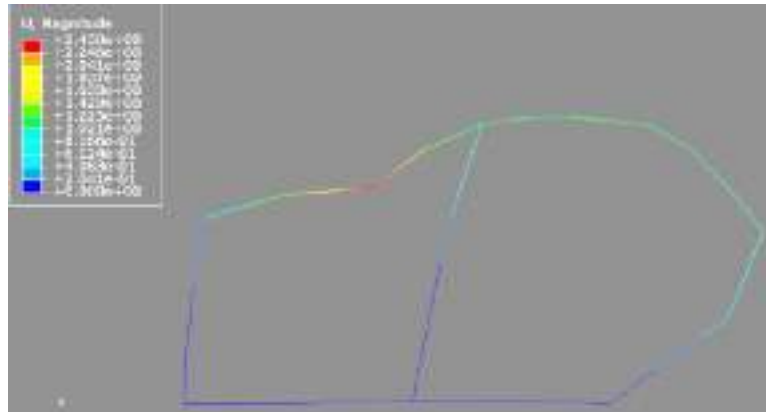


Рисунок 2.19 – Деформація SSSM під дією зсувного навантаження

3- Жорсткість на кручення остаточно розраховується за наведеною формулою [12]:

$$k_t = \frac{1}{\left(\frac{q}{t}\right)^2 \sum_1^i \left[ \frac{\text{area of surface } i}{(G_t)_{eff}} \right]_{surf i}} \quad (2.4)$$

де  $k_t$  — жорсткість на кручення,  $t$  — товщина панелі, вважається постійною для всіх панелей,  $i$  — номер спрощеної панелі,  $q$  — зсувний потік у панелях, який можна розрахувати за формулою:

$$q = \frac{Q_i}{\text{the edge to which } Q_i \text{ is applied}} \quad (2.5)$$

Було доведено, що жорсткість на кручення значною мірою залежить від жорсткості бічних панелей; фактично на ранніх стадіях проектування немає потреби досліджувати ефективний модуль зсуву для інших панелей. Таким чином,  $(G_t)_{eff}$  було розраховано лише для бічних панелей, а для інших панелей воно вважалось 79,3 ГПа. Отримана жорсткість на кручення показана в таблиці 2.4.

Жорсткість на кручення в VMOS, VMES і CBSM. Граничні умови. У цих моделях поступальні та обертальні DOF 25 вузлів у кожній вежі задньої підвіски обмежені та вільні відповідно. Ця функція імітує умови, близькі до

									Арк.
									41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ				

експериментальних випробувань. Крім того, асиметричні граничні умови в програмі ABAQUS задані для всіх вузлів BMOS для більш реалістичної плоскої деформації.

Таблиця 2.4 – Жорсткість на кручення для кожної моделі

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

Щоб застосувати крутний момент до передньої панелі ВІW, до башт передньої підвіски було застосовано пару сил протилежних напрямків. Потім крутний момент розраховується за формулою [12]:

$$T = wF_C, \quad (2.7)$$

де  $w$  — поперечна відстань між двома вежами передньої підвіски, яка становить 1451 мм, а  $F_C$  — прикладена сила, яка становить 1000 Н. Граничні умови для кожної моделі зображені на рисунку 2.20.

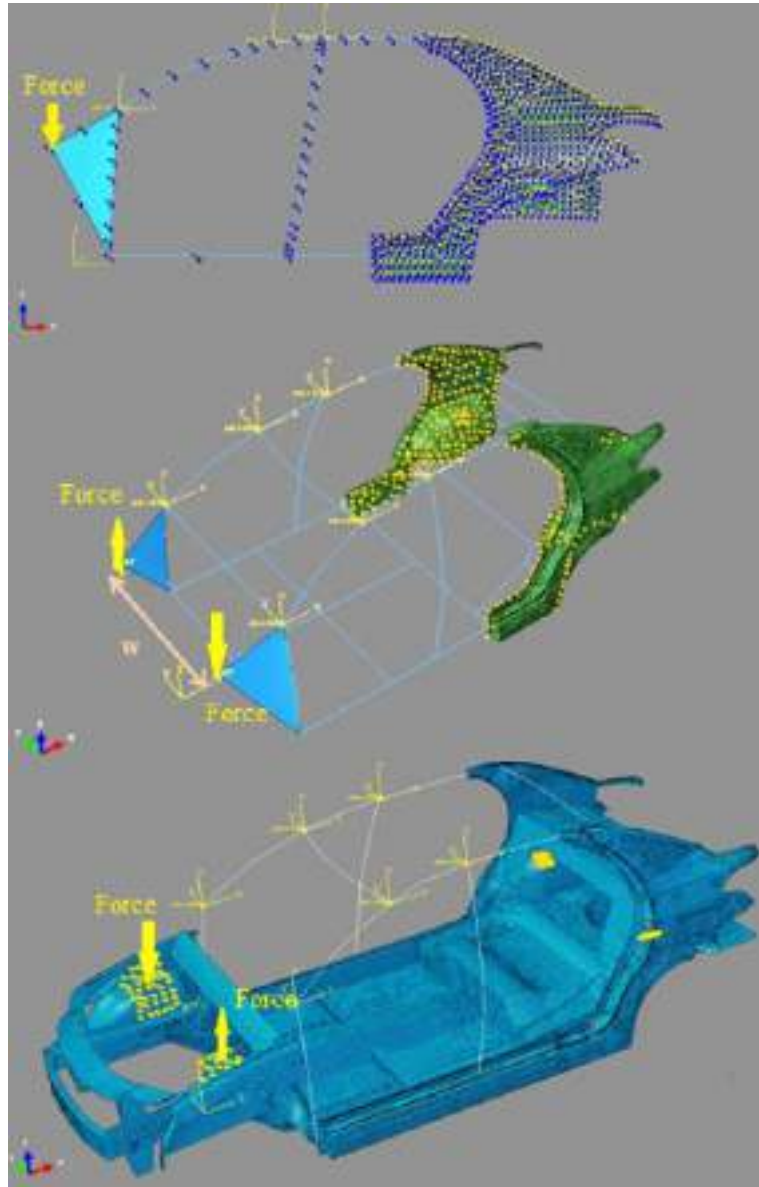


Рисунок 2.20 – Граничні умови моделей при розрахунку жорсткості на кручення

Розрахунок жорсткості на кручення.

Розрахунок жорсткості на кручення проводили за формулою [6]:

$$k_t = \frac{T}{\tan^{-1}\left(\frac{2\gamma}{w}\right)} \quad (2.8)$$

де  $w$  – максимальне вертикальне переміщення башти передньої підвіски. Відповідні значення отриманої крутильної жорсткості, а також деформації моделей представлені в таблиці 2.5 і на рисунку 2.21 відповідно.

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

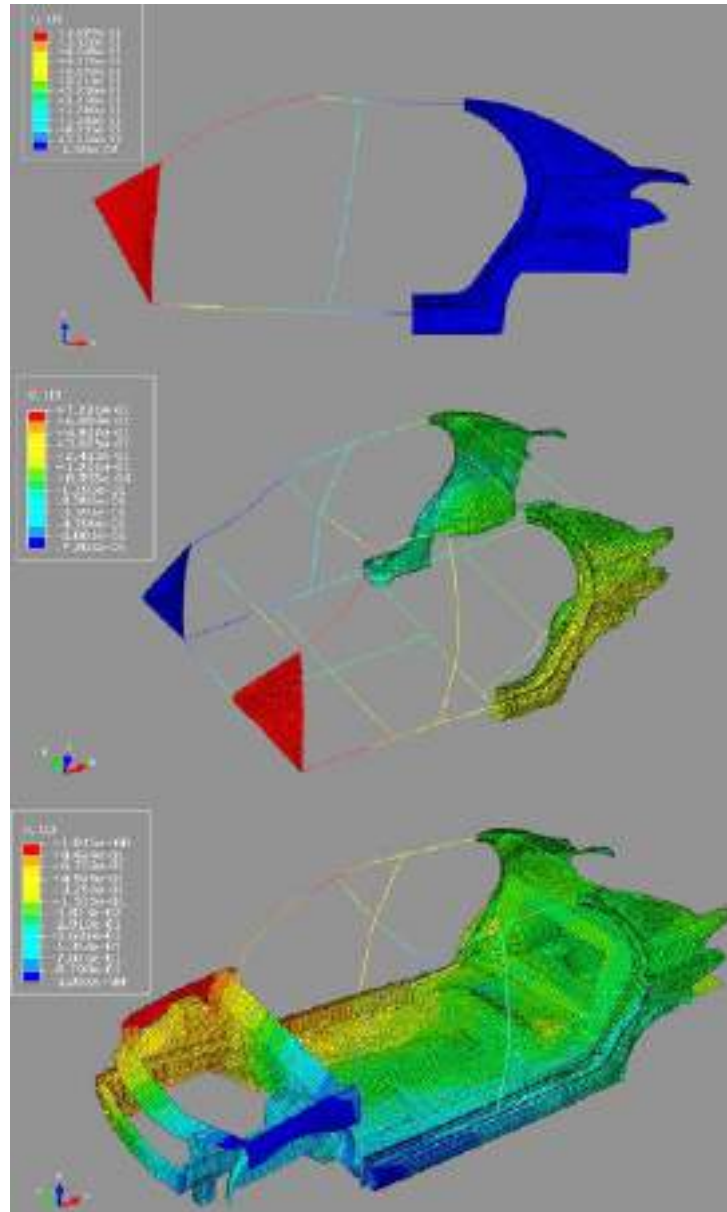


Рисунок 2.21 – Деформація моделей при крутильному навантаженні  
 Порівняння відсотка похибок у отриманій жорсткості на кручення та вигин для всіх моделей зображено на рисунку 2.22.

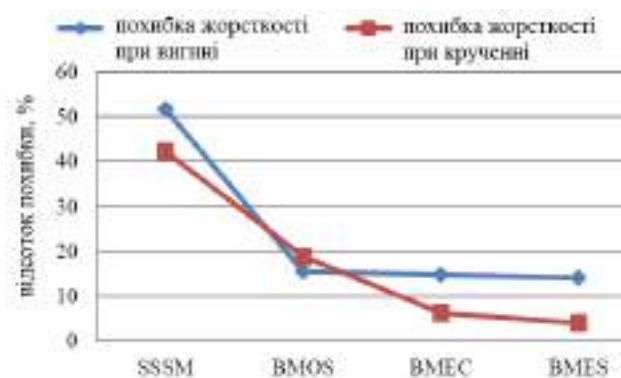


Рисунок 2.22 – Порівняння відсоткової похибки в різних моделях.

Загальний відсоток похибок у всіх моделях є відносно низьким, що ілюструє достовірність моделювання FE. Відповідно, як і передбачено, одночасно зі збільшенням складності та необхідних даних моделі KE зменшується відсоток похибки в розрахунках жорсткості на кручення та згин. SSSM має найвищу похибку, що є показником необхідності розгляду чисельних методів з експериментальними даними, а не виключно покладатися на теоретичні формулювання на концептуальній стадії. Відсоток похибки у жорсткості на вигин і кручення SSSM, порівняно з BMOS, на 36% і 24% вище відповідно, що підкреслює необхідність моделювання чвертьпанелі як поверхні. Від BMOS до ВМЕС різниця досить незначна (приблизно 1% у жорсткості на вигин і 12% у жорсткості на кручення).

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

### 3 КАРКАС БЕЗПЕКИ СПОРТИВНОГО АВТОМОБІЛЯ

3.1 Аналіз конструкцій та призначення каркасу безпеки спортивних автомобілів.

Рама (кузов чи каркас) є базовим несучим елементом практично будь-якого наземного колісного транспортного засобу та призначений для встановлення на ньому всіх вузлів та агрегатів.

Каркас, як правило, використовується в гоночних автомобілях (болідах), автобусах та інших спеціальних автомобілях.

Каркас є найбільшою, дорогою і важливою складовою автомобіля, так як від його міцності та жорсткості залежать такі важливі показники, як керованість, безпека, вантажопідйомність та ряд інших.

У разі гоночних автомобілів (болідів) завдання оптимізації каркаса набуває найбільш важливого значення, тому що економія кожного кілограма і навіть грама матеріалу дозволяє отримати найкращий результат у гонці [13].

Клітина безпеки - просторова конструкція, розроблена і призначена для запобігання серйозній деформації кузова у разі зіткнення або перевероту автомобіля.

Дуга безпеки – структурна рама (або петля) з точками кріплення.

Каркас безпеки - просторова конструкція, що складається з головної дуги та передньої дуги (або двох бічних дуг), елементів їх з'єднання, одного діагонального елемента, задніх розпірок і точок кріплення.

Спочатку каркаси безпеки застосовувалися в ралійних перегонах, але пізніше їхнє застосування стало обов'язковим і в інших перегонах. Він виготовляється лише з круглих труб, тому що округлені боки менш травмо небезпечні. Залежно від складності конструкції каркаса можливі різні варіанти посилення. Починаючи від простого — бугеля-арки над головами водія та пасажирів — і закінчуючи складним — просторовим скелетом, який

										Арк.
										46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ					

поєднує в одну силову структуру чашки передньої та задньої підвіски, пороги та боковини, а також клітку безпеки самого салону. В обов'язковому порядку каркас застосовують з метою зменшення деформації даху при перекиданні автомобіля і для запобігання важких травм та для збереження життя гонщику.

Каркаси бувають розбірними (збірними) та не розбірними (зварними) .

Збірно-розбірні каркаси - це найчастіше клітка безпеки в салоні, закріплена до бічної стійки, порога-підлоги. Всі труби з'єднані між собою болтами, саме тому будь-якої миті можна викрутити болти і розібрати всю конструкцію. Також його називають болтовий каркас безпеки (рис. 3.1).

Зварний каркас - зазвичай складний за конструкцією, пов'язаний із силовою структурою автомобільного кузова, застосовується в ралійних перегонах. Встановлення каркасу безпеки в даному випадку складна та кропітка робота. Необхідно розібрати весь салон до металу, зробити технічні отвори в різних частинах кузова для встановлення труб, з'єднати їх між собою і всю цю справу зварити.

Каркаси жорсткості існують для двох або чотирьох дверних кузовів (двох дверні кузови та каркаси мають більшу жорсткість). Також варто відзначити, що при встановленні більшості складних каркасів машина перетворюється з 4-5 місної на двомісну. Оскільки задні сидіння віддають для переплетення та кріплення труб. Виходячи з обсягу труб їх установки, каркас створює певні проблеми з оглядовістю. До них найчастіше кріплять чотири або п'яти точкові ремені безпеки [14].

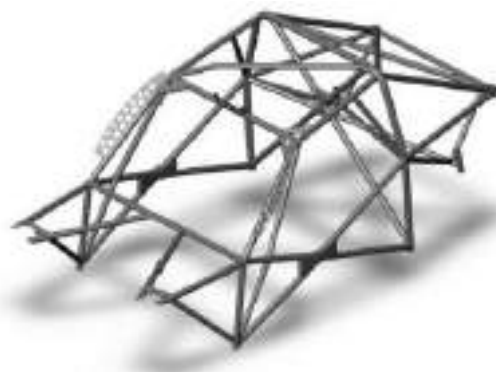
Каркаси бувають омологовані та не омологовані. В даному випадку омологація - це узгодження конструкції, матеріалу та технології виготовлення каркасів безпеки з представниками FIA чи національної автоспортивної федерації. Зокрема, якщо виробник збирається використовувати у своєму каркасі матеріал, що відрізняється за характеристиками від вимог FIA [15], каркас повинен бути підданий

									Арк.
									47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ				

статичним випробуванням навантаження, або повинен бути представлений чисельний розрахунок міцності за певною методикою.



а)



б)

Рисунок 3.1 – Каркаси безпеки:

а – болтовий; б) – зварний

Інша поширена особливість – кріплення каркаса до кузова. Якщо виробник збирається кріпити каркас до кузова автомобіля зварюванням — обов'язкова омологація. Також у ряді випадків відступають від запропонованої FIA схеми каркаса, що також вимагає омологації. У той же час FIA допускає застосування і неомологованих каркасів (деякі їх називають «громадянськими» або, як ми писали вище, «збірно-розбірні»). У такому випадку каркас повинен бути зроблений із певної сталі, труб певних розмірів, мати певну конструкцію та кріпитися до кузова болтами. Один і той же виробник має право випускати омоологовані каркаси та неомологовані, але відповідні вимогам FIA [15].

Головна характеристика міцності автомобільного кузова, а саме, жорсткість на скручування, закладається ще на заводі при проектуванні автомобіля. У спортивних автомобілів жорсткість значно вища, ніж у звичайних базових. Слід звернути увагу на те, що серійні авто випускаються на конвеєрах, тому завжди є місця, які варто додатково зміцнити перед використанням кузова у професійному спорті. Якщо жорсткість кузова не

									Арк.
									48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ				

досить висока, то реакція на поворот рульової колонки стає заповільненою - вигин кузова і податливість металу в зонах кріплення важелів підвіски вносять неузгодженість у роботу передньої та задньої осі автомобіля. При постійному скручуванні автомобіля накопичується втома металу, виникає його старіння, що з часом призводить до розходження зварювальних швів кузова та поширення корозії. На жорсткість (керованість) впливає і тип кузова автомобіля. У цьому плані 3-х дверні хетчбеки та купе по жорсткості випереджають інших через свою форму кузова. Вони забезпечує максимальний опір вигину завдяки відсутності додаткових дверних отворів та своїй компактній формі. Найнижчу жорсткість мають мінівени та універсали. Встановлюючи автомобільний каркас безпеки, кузов вже перестає бути несучою конструкцією і починає виконувати швидше роль обкладинки. Все навантаження сприймає каркас і рівномірно розподіляється по ньому, завдяки перетину понад десятку труб, про які йтиметься нижче. Автомобіль стає міцнішим, і реакція на повороти керма зростає в рази.

Технічні специфікації [14]:

- головна, передня та бічна дуги: ці дуги повинні бути виготовлені з одного шматка труби без з'єднань. Їхня поверхня повинна бути гладкою і рівною, без складок або тріщин. Вертикальна частина головної дуги повинна бути настільки прямою, наскільки це можливо і розташовуватись наскільки можливо близько до внутрішнього контуру кузова. Передня стійка передньої дуги або бічної дуги повинна бути прямою, або, якщо це неможливо, повинна слідувати за стійками вітрового скла і мати лише один вигин у його найнижчій частині, так, щоб нижня частина стійки була вертикальною. Якщо роль задніх стійок бічних дуг виконує головна дуга (рис. 3.2), то бічні дуги повинні приєднуватися до головної дуги на рівні даху. Для досягнення найбільш ефективного кріплення до кузова, внутрішні накладки кузова можуть бути змінені біля каркасу безпеки та елементів його кріплення шляхом їх зрізання або вигину. Однак цей дозвіл не допускає видалення

										Арк.
										49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ					

повністю накладок або деталей оббивки. Якщо це необхідно, блок запобіжників може бути переміщений, якщо він заважає встановленню каркасу безпеки.

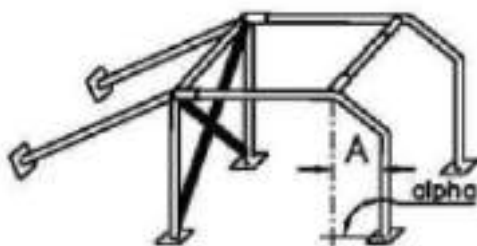


Рисунок 3.2 – Підсилювач задньої дуги каркасу безпеки

Монтаж каркасу безпеки до кузова: мінімальна кількість місць кріплення:

- 1 для кожної вертикальної опори головної чи бічної дуг;
- 1 для кожної вертикальної опори передньої дуги;
- 1 для кожної задньої розпірки, кожна монтажна опора передньої, головної та бічної дуги повинна мати підсилювальну пластину, товщиною не менше 3 мм і не менше товщини стінки труби, до якої вона приварена. Кожна монтажна опора повинна кріпитися не менше ніж трьома болтами до сталевій підсилювальній пластині, товщиною не менше ніж 3 мм і площею не менше ніж 120 см<sup>2</sup>, привареною до кузова. Приклади наведені рис. 3.3 Це не обов'язково для задніх розпірок. Болти повинні мати розмір принаймні М8 стандарту ISO 8.8 або вище. Кріплення має бути або самоконтрольним, або оснащуватися стопорними шайбами. Це – мінімальні вимоги. На додаток до цих вимог, може використовуватися більша кількість сполучних деталей, вертикальні опори дуг можуть бути приварені до підсилювальних пластин, каркас безпеки може бути приварений до кузова. Вертикальні опори дуг не можуть бути приварені безпосередньо до кузова без підсилювальних пластин. Якщо кузов (або шасі) виконані з алюмінію, будь-яке зварювання між кузовом і каркасом заборонено, можна тільки приклеювати підсилювальні пластини.

Кожна монтажна опора повинна кріпитися не менше ніж трьома болтами до сталевій підсилювальній пластині, товщиною не менше ніж 3 мм і площею не менше ніж 120 см<sup>2</sup>, привареною до кузова. Приклади наведені рис. 3.3 Це не обов'язково для задніх розпірок. Болти повинні мати розмір принаймні М8 стандарту ISO 8.8 або вище. Кріплення має бути або самоконтрольним, або оснащуватися стопорними шайбами. Це – мінімальні вимоги. На додаток до цих вимог, може використовуватися більша кількість сполучних деталей, вертикальні опори дуг можуть бути приварені до підсилювальних пластин, каркас безпеки може бути приварений до кузова. Вертикальні опори дуг не можуть бути приварені безпосередньо до кузова без підсилювальних пластин. Якщо кузов (або шасі) виконані з алюмінію, будь-яке зварювання між кузовом і каркасом заборонено, можна тільки приклеювати підсилювальні пластини.

										Арк.
										50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ					

Задні розпірки - обов'язкові та повинні прикріплюватися до головної дуги якомога ближче до рівня даху, у найвищих точках вигину головної дуги по обидва боки автомобіля. Вони повинні розташовуватися під кутом не менше  $30^{\circ}$  до вертикалі, повинні бути прямими, спрямованими назад і знаходитися якомога ближче до внутрішніх бокових панелей кузова. Монтаж розпірок до кузова повинен здійснюватися через підсилювальні пластини. Кожна розпірка повинна кріпитися болтами, що мають сумарний поперечний переріз не менше ніж  $2/3$  від рекомендованого для стійок дуг і з ідентичними підсилювальними пластинами, площею принаймні  $60 \text{ см}^2$  (рис. 3.3). Допускається один болт, що працює у двох напрямках, якщо він має достатній переріз і міцність і за умови, що в розпірку вварена втулка.

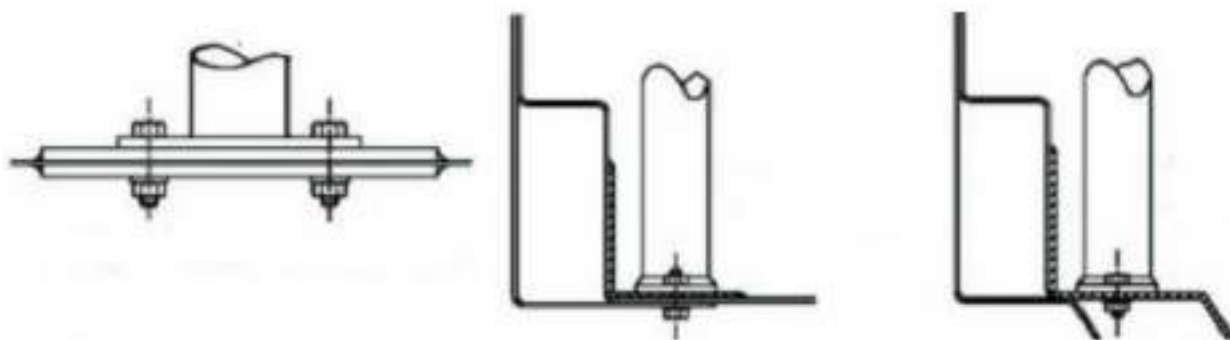


Рисунок 3.3 – Варіанти кріплення розпірок

Діагональні елементи - наявність хоча б одного діагонального елемента обов'язково. Їхнє розташування має відповідати рисункам 3.1 і 3.2, і вони повинні бути прямими, не вигнутими. Розташування точок кріплення діагональних елементів має бути травмобезпечним. Вони можуть бути знімними, але мають бути на місці протягом змагання. Нижній кінець діагоналі повинен приєднуватися до задньої розпірки або головної дуги не далі ніж  $100 \text{ мм}$  від місця її кріплення до кузова. Верхній кінець діагоналі повинен приєднуватися до головної дуги або задньої розпірки не далі  $100 \text{ мм}$  від місця їхнього з'єднання між собою.

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Додаткові підсилювальні елементи каркасу безпеки: Діаметр, товщина та матеріал повинні відповідати вказівкам у таблиці 3.1. Вони мають бути або вварені, або встановлені за допомогою розбірних з'єднань.

Поперечні підсилювальні елементи - застосування двох поперечних елементів як на рис. 3.2 дозволено. Поперечний елемент встановлений на передню дугу не повинен проходити через простір, призначений для пасажирів. Він повинен розташовуватися настільки високо, наскільки можливо, але його нижній край не повинен бути вищим за вершину приладової панелі.

Посилення даху – зміцнення верхньої частини захисного каркасу, додаванням елементів як на рис. 3.4 – дозволено.

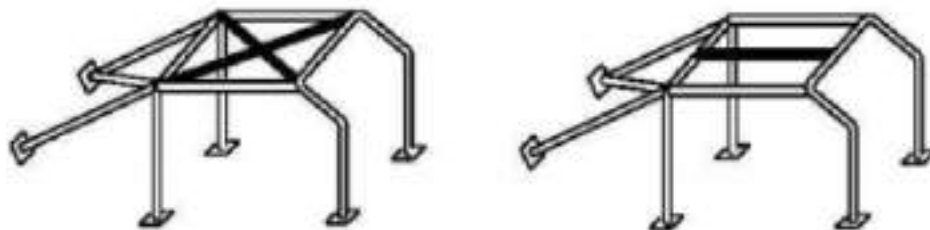


Рисунок 3.4 – Дах каркасу безпеки

Посилення згинів та з'єднань – дозволяється посилювати з'єднання головної дуги або передньої дуги з поздовжніми розпірками (рис. 3.5), а також верхні задні вигини бічних дуг та з'єднання між головною дугою та задніми розпірками.

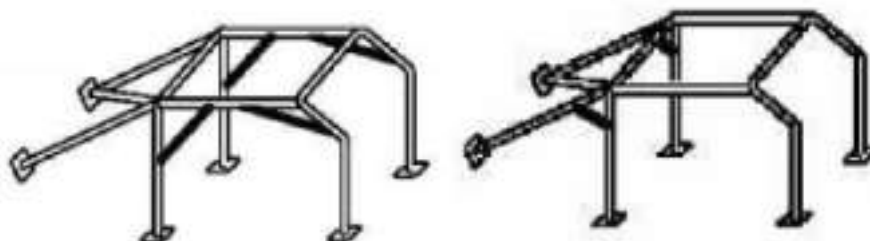


Рисунок 3.5 – Посилення згинів та з'єднань

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Посилення повинні бути виконані з труб або з вигнутого листового металу U-подібної форми (див. рис. 3.6). Кінці цих посилень не повинні розташовуватися: далі половини довжини елементів, до яких вони кріпляться, якщо це не крапка з'єднання елемента бічного захисту з передньою дугою, в цьому випадку, посилення зчленування передньої дуги, можуть кріпитися до передньої дуги в місці кріплення бокового захисту на відстані від двох до трьох діаметрів труб, що з'єднуються, рахуючи від вершини кута. Товщина елементів, що утворюють посилення, не повинна бути менше 1 мм.

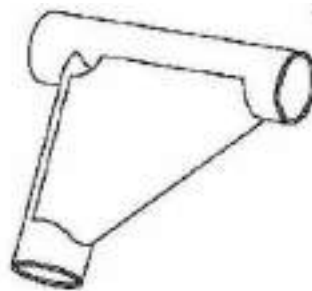


Рисунок 3.6 – Підсилювач

Захисні накладки – у місцях, де частини тіла водія або штурмана можуть контактувати з каркасом безпеки, повинна бути передбачена установка незаймистих захисних накладок. У місцях, де шоломи водія та штурмана можуть контактувати з каркасом безпеки, повинна бути передбачена установка захисних накладок.

Знімні елементи - якщо в конструкції каркасу безпеки використовуються знімні елементи, роз'ємні з'єднання, що використовуються, повинні відповідати типу, схваленому ФІА. З'єднання не повинні бути завареними. Гвинти та болти повинні відповідати стандарту ISO 8.8 або краще. Слід зазначити, що розбірні шарнірні з'єднання не повинні використовуватися як частина головної, середньої або бічної дуг, тому що вони діятимуть як петлі в несучій структурі та допускатимуть її деформацію. Вони використовуються

										Арк.
										53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ					



згинання приймає овальну форму, відношення мінімального до максимального діаметра має бути 0,9 або більше.

Розглянемо елементи каркасу безпеки (рис. 3.7) [14].

A-post gusset – вставка для з'єднання каркаса та передньої стійки кузова: Дана вставка забезпечує необхідну міцність при встановленні каркаса – вставка приварюється вздовж труби каркаса та приварюється до передньої стійки кузова – конструкція утворює єдине ціле.

Door X bars - X-подібні підсилювачі дверного отвору: захищає при бічних ударах, значно збільшує міцність та жорсткість дверного отвору.

Dash bar – поперечна труба під панеллю приладів: Збільшує міцність і жорсткість каркаса при бічних ударах.

Hoop to A-pillar tube – підсилювач задньої стійки та даху: Призначений для підтримки дуги на рівні даху.

Front cross – переднє перехрестя труб: Забезпечує міцність у поперечному напрямку силової схеми.

Mid rear stay – розтяжки від середньої дуги до задньої частини кузова: забезпечує захист від бічних ударів, збільшує міцність задньої частини каркасу.

Hoop cross - X-подібна розтяжка середньої стійки: Забезпечує жорсткість і міцність каркаса при перекиданні на дах.

Rear strut brace - задня розтяжка між стійками: Забезпечує велику міцність кузова та розподіляє навантаження від підвіски на основи каркаса, може бути використаний для кріплення ременів безпеки.

Lower rear stay - розтяжка від основи середньої дуги до задньої частини кузова: Утворює гіпотенузу трикутника, забезпечує більшу жорсткість та міцність задньої частини кузова.

Roof cross або roof «V» - хрест на даху або труби зварені V-образно біля задньої дуги: Збільшує жорсткість каркасу та безпеку людей при перекиданні на дах.

									Арк.
									55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ				



та штурмана. Також передає навантаження на дуги каркаса забезпечуючи, тим самим, захист від бічних ударів.

### 3.3 Побудова каркасу безпеки.

#### 3.3.1 Загальне компонування транспортного засобу.

Залежно від типу приводу і розташування двигуна розрізняють такі види компонування:

- Класичне компонування. За класичним компонуванням побудовано найбільшу кількість не тільки саморобних автомобілів, а й промисловістю, що випускаються. У такій компоновці двигун розміщений в передній частині автомобіля, а провідними є колеса задньої осі. До переваг даної компоновки відносяться можливість отримання більш однакових мас, що припадають на передню і задню осі, високі ходові якості, можливість використання готових вузлів серійних автомобілів. До недоліків слід віднести нераціональне використання простору кузова через великий простір, зайнятий двигуном і карданом, що проходить через весь кузов по середині підлоги салону.

- Передньопривідне компонування. Другий за поширеністю є передньопривідне компонування, при якому передні колеса є одночасно провідними та керованими. До безперечних переваг цієї компоновки слід віднести високу стійкість при русі, низькі механічні втрати в трансмісії внаслідок більш короткого силового потоку, більш повне використання простору кузова (його салону). До недоліків слід віднести складнішу конструкцію вузла двигун - коробка передач, розвантаження передніх коліс при торканні.

- Із заднім розташуванням двигуна. Третім типом компоновочного рішення є автомобілі з розташованим ззаду двигуном. Перевагою подібної

										Арк.
										57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ					

схеми є хороша завантаженість провідних задніх коліс, можливість більш раціонально спроектувати салон. До недоліків відносяться менша маса, що припадає на передню вісь, що призводить до погіршення керуваності автомобіля.

Розгляд компоновок за типом приводу було б неповним, якщо не розглядати так звані повнопривідні автомобілі, коли всі колеса як передньої, так і задньої осі є провідними. Таке компонування використовується в основному на автомобілях підвищеної прохідності. Розрізняють постійний повний привід і повний привід, що відключається, коли може бути відключений привід на одну з осей: або передню, або задню. До переваг такої компоновочної схеми відноситься підвищена прохідність автомобіля за рахунок гарного зчеплення всіх коліс, висока стійкість на слизькій дорозі. До недоліків слід віднести підвищену складність конструкції шасі та приводу. Необхідно встановлювати додаткову роздавальну коробку і додаткові карданні зчленування. Автомобілі, скомпоновані за цією схемою, мають підвищену витрату палива за рахунок збільшення механічних втрат у трансмісії.

Модернізуватиметься автомобіль марки BMW3-ї серії (рис. 3.8) для участі в автоспорті, для чого обов'язково необхідно оснастити його каркасом безпеки для водія. Розглянемо характеристики авто (таблиця 3.2).

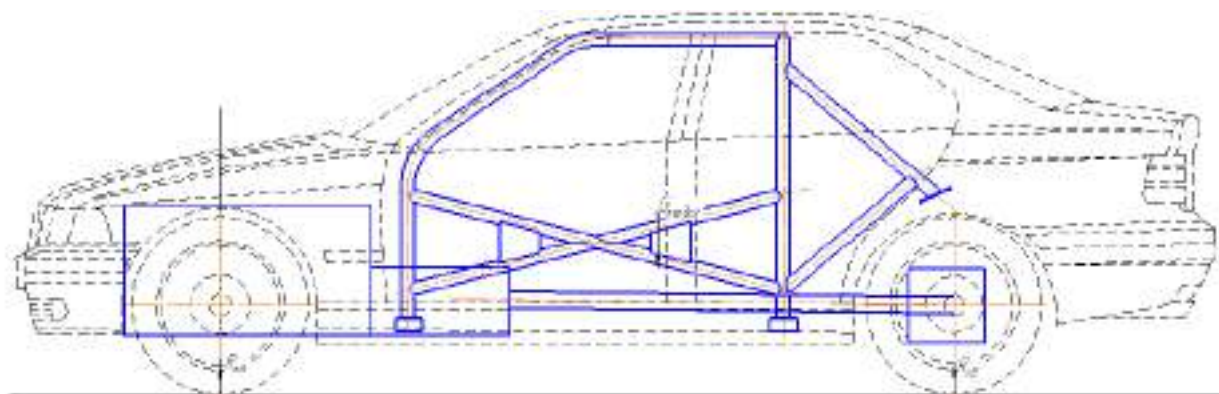


Рисунок 3.8 – Компонування транспортного засобу BMW 3.

									Арк.
									58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ				



порожнього автомобіля. Ординату  $h_0$  у першому наближенні приймаємо рівною:

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

$$h_0 = 1,5 \cdot 295 = 442,5 \text{ мм.}$$

Абсцис порожнього автомобіля  $x_0$  визначають з рівняння моментів, зіставленого щодо центру А (рис. 3.9).

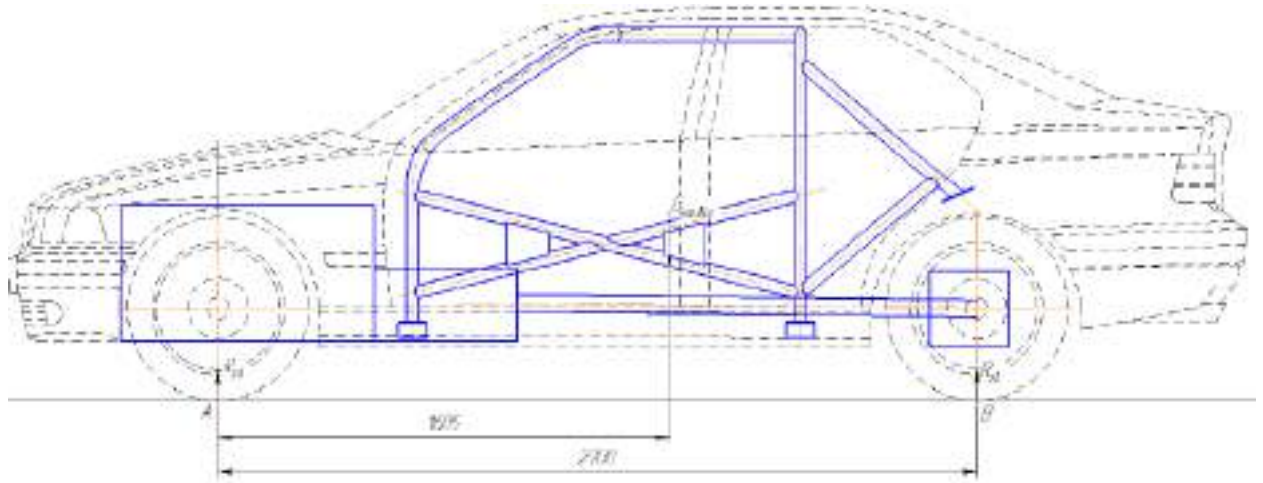


Рисунок 3.9 – Розрахункова схема визначення координат ЦМ порожнього автомобіля.

$$(m_1l_1 + m_0L - m_0x_{0n})g = 0, \quad (3.2)$$

$$x_{0n} = \frac{m_1l_1 + m_0L}{m_0}, \quad (3.3)$$

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

Складаємо розрахункову схему для знаходження координат ЦМ навантаженого автомобіля (рис. 3.10).

Абсцису навантаженого автомобіля  $x_0^N$  визначають з рівняння моментів, зіставленого щодо центру А (рис. 3.10).

$$(m_0l_1 + m_1l_2 + m_2l_3 + m_3l_4)g = 0, \quad (3.4)$$

										Арк.
										60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ					





Каркас кожної моделі розробляється індивідуально. Сам каркас продається у вигляді набору труб та інструкцій. По-перше, це сертифікат виробу, в якому написано, з яких деталей він складається і в якій послідовності його потрібно збирати. По-друге, це фірмова ідентифікаційна табличка, яка за правилами має бути встановлена на каркасі. І, по-третє, звісно, сам набір вже зігнутих та нарізаних труб.

Збирати каркас потрібно суворо за схемою, що додається. Якщо послідовність операцій порушити, то у якийсь момент можна зіткнутися із ситуацією, коли чергову трубу ми просто не зможемо поставити на відведене їй місце.

Труби з'єднуються між собою за допомогою зварювання. Відповідно до вимог безпеки ГІА, "переважне електродугове зварювання в середовищі захисного газу. Зварний шов повинен повністю оперізувати периметр труби" [15].

Дотриматися цих вимог буває досить важко: каркас повинен проходити максимально близько до кузова і даху, де іноді знаходяться з'єднання трьох-чотирьох труб. Проте каркас ставиться на машину без демонтажу даху (правда, в поодиноких випадках це все ж таки доводиться робити). Фото монтажу наведено в додатку Б.

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

## ВИСНОВКИ

1. Дах легкового автомобіля не підлягає обов'язковим випробуванням захисних властивостей при перекиданні. Перекидання (перевороти) становлять приблизно 18% від усіх смертних випадків в аваріях. Позашляховики та спортивні автомобілі найбільш схильні до перекидання, особливо ті, що оснащені підвіскою для бездоріжжя. Збільшена висота підвіски збільшення кліренсу на бездоріжжі піднімає центр ваги.

2. Сучасні досягнення в області математичного моделювання, кінцево-елементних моделей, високої продуктивності обчислювальної техніки зробили можливим моделювання надзвичайно складних технічних систем і комплексів. Цифрові близнюки, побудовані на основі цих технологій, змінили багато підходів до інженерних розрахунків, а також до проектування та сертифікації.

3. Загальний відсоток похибок визначення жорсткості кузова автомобіля у всіх розглянутих моделях є відносно низьким, що ілюструє достовірність та адекватність моделювання несучої системи автомобілів.

4. Каркас кожної моделі розробляється індивідуально. Каркас для спортивних автомобілів продається у вигляді набору труб та інструкцій.

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

## 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-oprokidyvanie-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.

										ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							65

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>.

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

ДОДАТКИ

					ДРАТТАМ 2320112.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67



# ***Моделювання каркасу безпеки на базі легкового автомобіля***

Виконав ст. гр. АТс-20-2:

***Саух Роман Анатолійович***

Науковий керівник: к.т.н., доц. каф. ТАМ:

***Посонський Сергій Феліксович***

**Як відомо, собівартість виготовлення рамних конструкцій та кузовів в автомобілях може сягати половини від загальної вартості.**



Автомобільний кузов є своєрідним «скелетом» всього автомобіля і вирішує одночасно кілька завдань: сприйняття робочого навантаження (пасажери та вантаж), захист водія та пасажирів від травм при виникненні аварійних ситуацій тощо.

Таким чином, проектування каркасів і рам автомобілів можна віднести до дуже трудомісткого з погляду інженерно-технічних витрат завданням, тому що необхідно вирішувати часом суперечливі завдання і вимоги.

Особливу роль при проектуванні кузова чи каркаса відіграє його оптимізація структури із застосуванням сучасних методів проектування, у тому числі - метод кінцевих елементів (МКЕ).

**Метою роботи** є моделювання каркасу безпеки автомобіля з дослідженням його міцності і жорсткості.

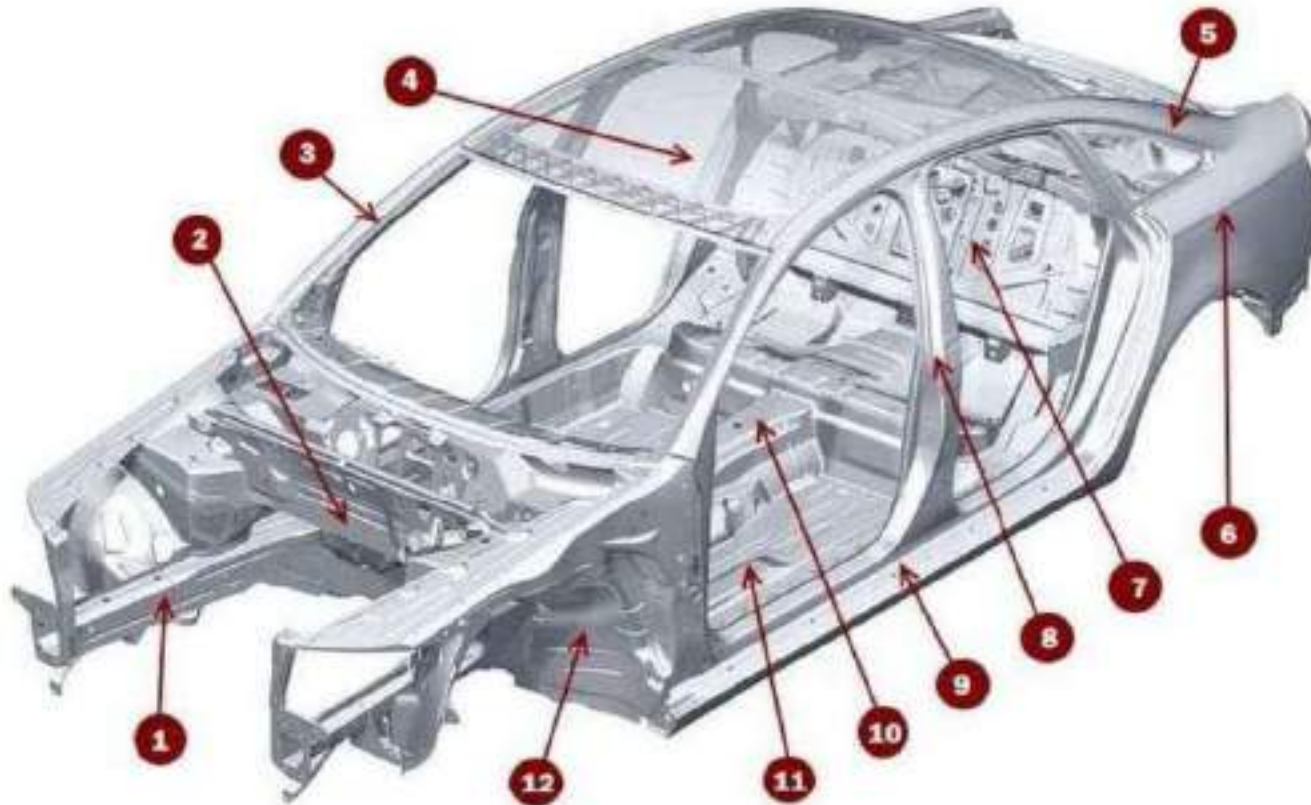
Для досягнення поставленої мети було сформульовано та вирішено такі основні **завдання:**

1. Аналіз конструкції та умов роботи несучих систем автомобілів.
2. Огляд та аналіз існуючих методів і моделей перевірки міцності несучих систем автомобілів.
3. Дослідження жорсткості та міцності несучої системи автомобіля на спрощених моделях методами моделювання.
4. Рекомендації до встановлення каркасу автомобіля з підвищенням рівня безпеки.

## Класифікації несучих систем автомобілів



## Елементи кузова автомобіля



1. **Передні та задні лонжерони.** Є прямокутними балками, які забезпечують жорсткість конструкції та гасіння коливань.
2. **Передній щит.** Відокремлює моторний відсік від пасажирського.
3. **Передні стійки.** Також забезпечують жорсткість та кріплять дах.
4. **Дах.**
5. **Задня стійка.**
6. **Заднє крило.**
7. **Багажна панель.**
8. **Середня стійка.** Забезпечує жорсткість кузова, виготовляється із міцної листової сталі.
9. **Пороги.**
10. **Центральний тунель,** де розташовуються різні елементи (вихлопна труба, карданний вал тощо). Також підвищує жорсткість.
11. **Підставка чи днище.**
12. **Надколісна ніша.**

## Матеріали для виготовлення кузовів

Кузов має бути легким і водночас міцним. Це забезпечується за рахунок застосування низько вуглецевої листової сталі. Основна товщина сталі становить: 0,8-2 мм.

Для рами застосовується сталь завтовшки: 2-4 мм. Найбільш важливі деталі, такі як лонжерони та стійки, виготовляються зі сталі, найчастіше легованої, товщиною: 4-8 мм, великовантажні автомобілі: 5-12 мм.



Алюмінієвий кузов Audi A8

Елементи кузова з розподілом по матеріалах в залежності від призначення

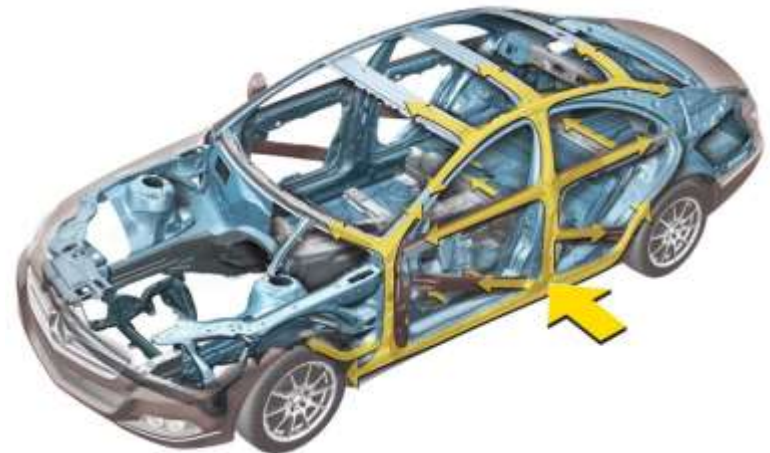
## БЕЗПЕКА ТА МІЦНІСТЬ КУЗОВНИХ КОНСТРУКЦІЙ



При зіткненнях з переду та ззаду на невеликих швидкостях основне навантаження приймають він так звані краш-бокси – елементи із запрограмованою деформацією. Вони стискаються, як гармошка, не пропускаючи енергію удару далі. Якщо ж удар сильніший, то навантаження розподіляється за всіма силовими елементами: лонжеронами, підрамниками, стійками даху тощо. Уся структура у разі зіткнення має працювати як єдине ціле.



Розподіл енергії удару при прямому зіткненні



Розподіл енергії удару при бічному зіткненні

Всі транспортні засоби різною мірою схильні до перекидання. Як правило, тенденція до перекидання збільшується зі збільшенням висоти центру мас, вузькістю колії осі, чутливістю кермового управління та збільшенням швидкості.



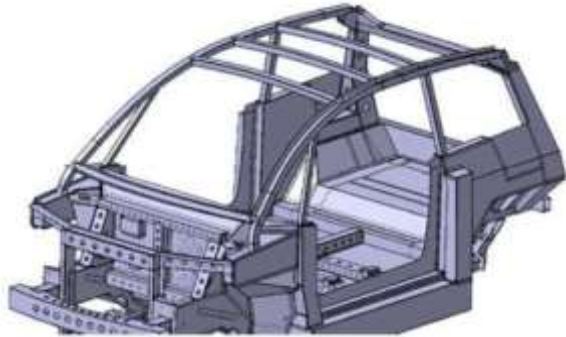
Випробування на міцність **даху** машини відрізняється від лобових та бічних краш - тестів. Інститут "IIHS" використовує для цього спеціальний стенд

Система **VIA** перевірки міцності **даху та дверей** при аварійному зіткненні забезпечує високу керованість та точність вимірювань

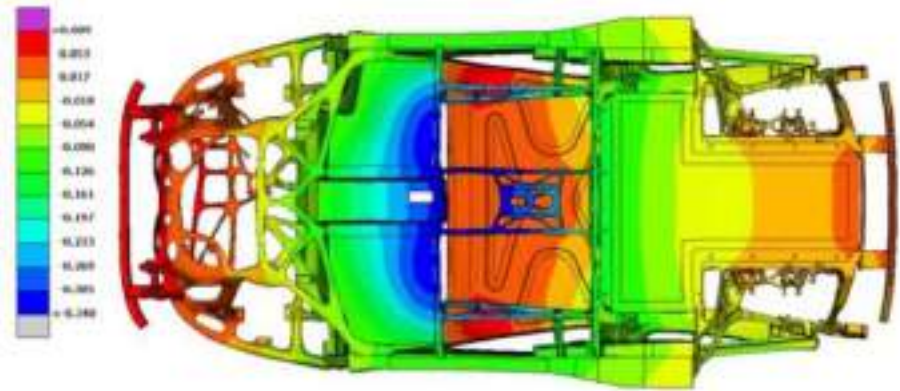


# Підходи до оцінки характеристик кузовів автомобіля на основі віртуального випробувального стенду.

Цифрові близнюки – це комп'ютерна модель, яка побудована на основі математичної моделі що відображає особливості створюваного об'єкта, які цікавлять проектувальника

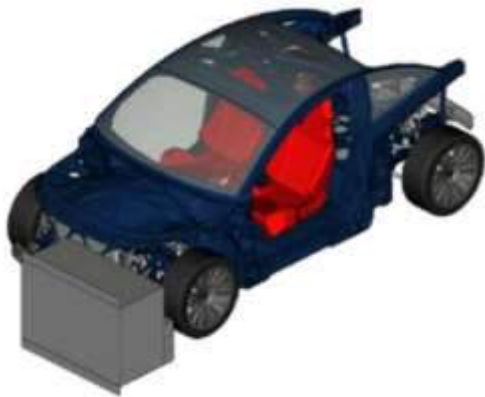


Загальний вигляд кузова автомобіля

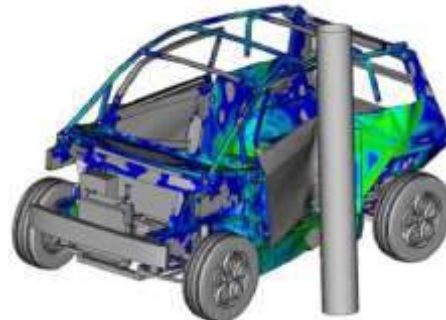


Результати аналізу жорсткості та міцності кузова автомобіля, отримані на віртуальному двійнику

Краш-тест VW Touran



Приклад візуалізації краш-тесту на віртуальному стенді



Візуалізація результатів симуляції краш-тесту, де оцінюється бічний удар

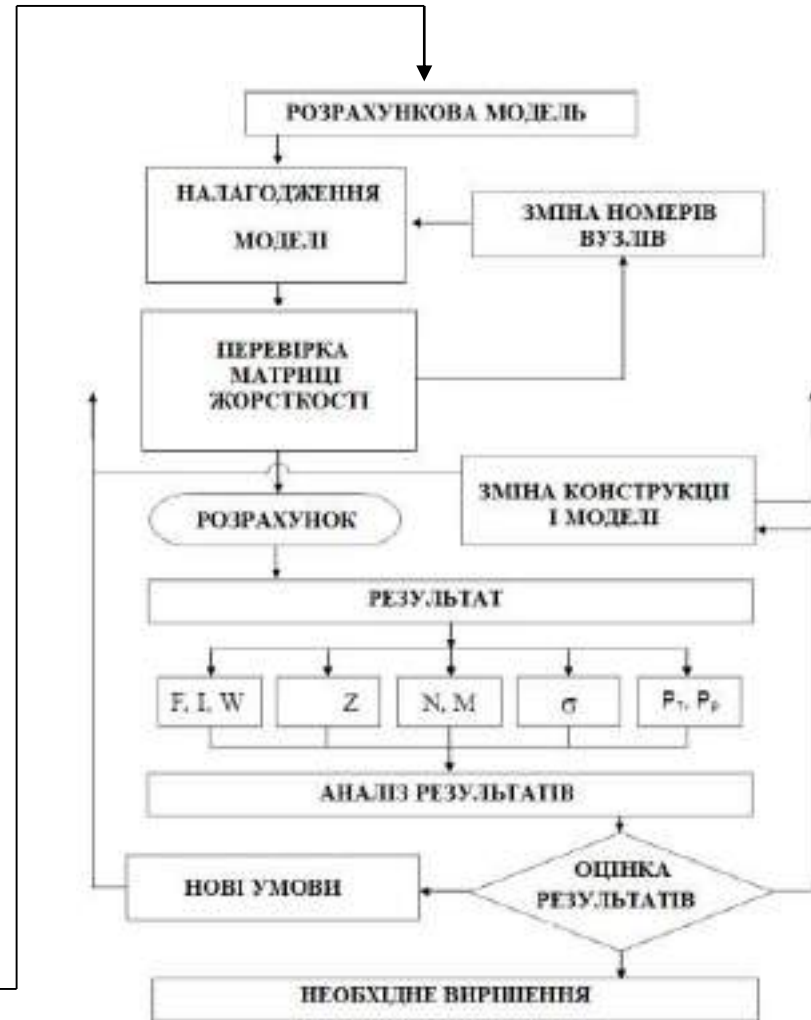
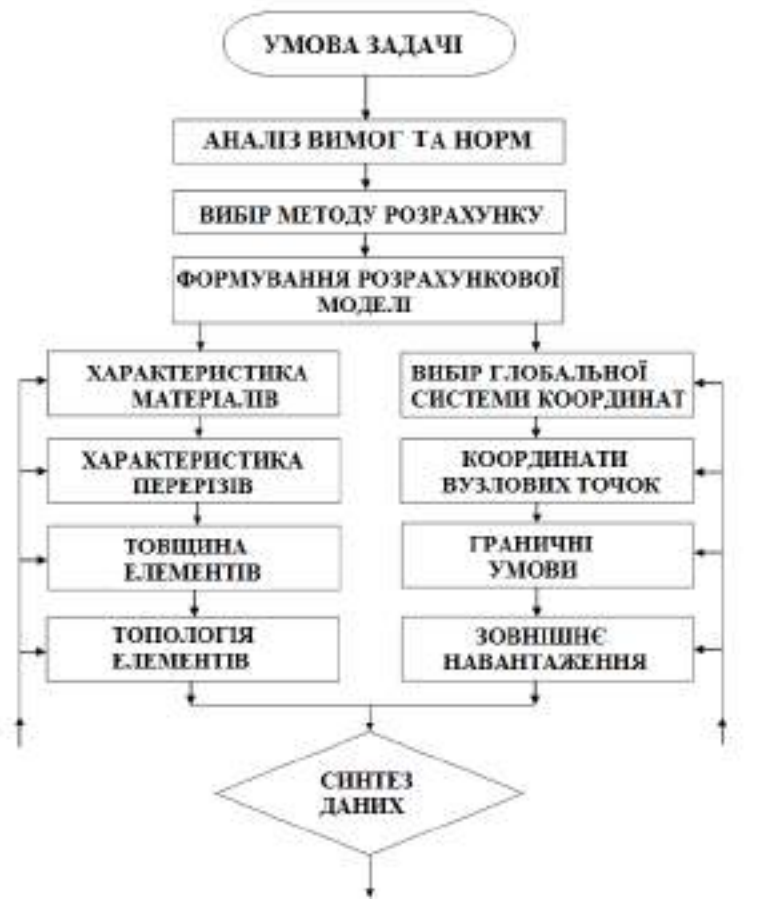


змодельований



реальний

## Загальна структурна схема вирішення розрахункової задачі з оцінки безпеки та міцності



**Жорсткість** - це властивість кузова автомобіля чинити опір динамічним і статистичним навантаженням в процесі експлуатації. Вона безпосередньо впливає на керованість. Чим вище жорсткість, тим краще керованість автомобіля.

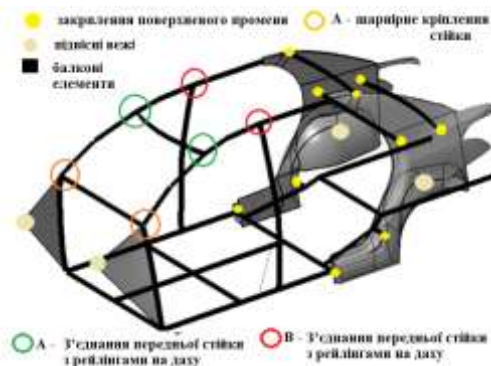
Жорсткість залежить від типу кузова, загальної геометрії, кількості дверей, розміру машини та вікон. Велику роль також відіграє кріплення та положення лобового та заднього скла. Вони можуть збільшити жорсткість на 20-40%. Для збільшення жорсткості встановлюються різні розпірки-підсилювачі.

**Є два параметри жорсткості - на вигин і кручення.**

**Дослідження жорсткості та міцності несучої системи автомобіля на спрощених моделях методами кінцевих елементів.**

Розглянемо 4 відомих методи:

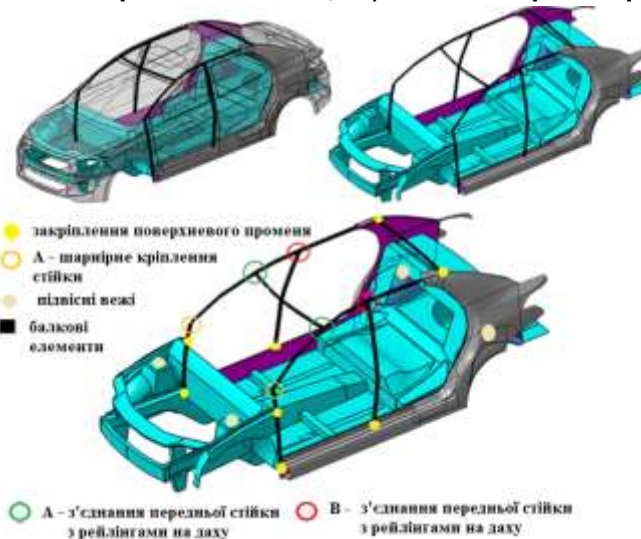
- 1) Проста модель структурної поверхні (SSSM)
- 2) Модель на основі балки для однієї сторони автомобіля (BMOS)
- 3) Модель на балці для всього кузова автомобіля (BMEC)
- 4) Модель пов'язаної поверхні променя (CBSM)



У моделі **BMEC** основні елементи конструкції ВІВ спрощено до балок. На рисунку показані з'єднання моделі та конфігурація геометрії.

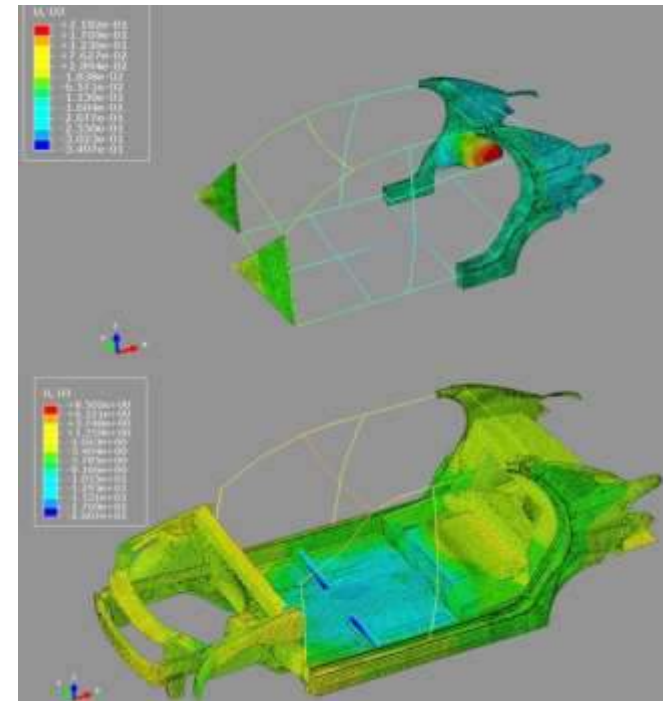
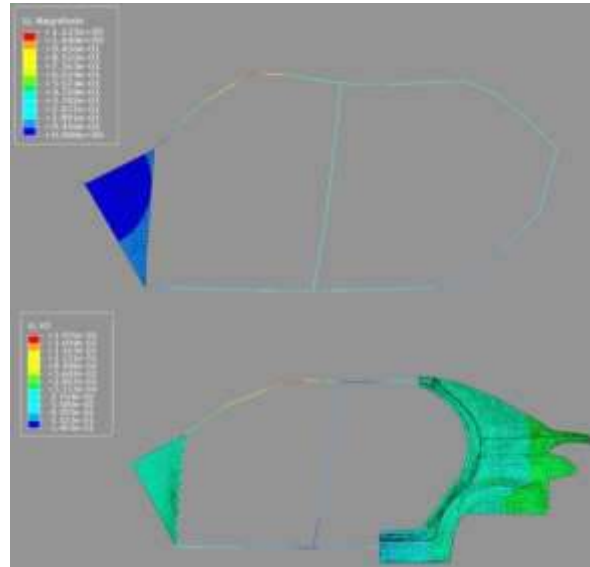
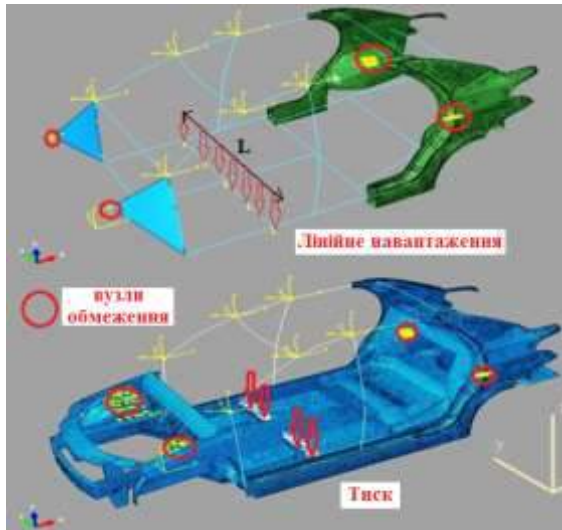
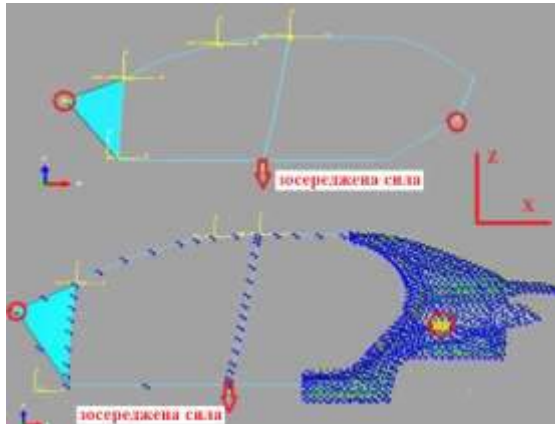
Проста структурна поверхня (SSS) — це плоский структурний елемент або вузол, який можна вважати жорстким лише у власній площині.

Ця модель чимось схожа на **SSSM** за геометрією; однак є дві фундаментальні зміни: 1) до моделювання додано поверхню чверті панелі з урахуванням більшої кількості геометричних деталей, і 2) модель є тривимірною.



У **CBSM** були досліджені ефекти двох важливих модифікацій, 1) вплив більш детального поверхневого моделювання замість спрощення балки, 2) характер взаємодії між балками та поверхнями в моделюванні FE. Крім того, опорну петлю було з'єднано з верхніми рейками, як показано на рисунку

## Аналіз жорсткості на вигин.



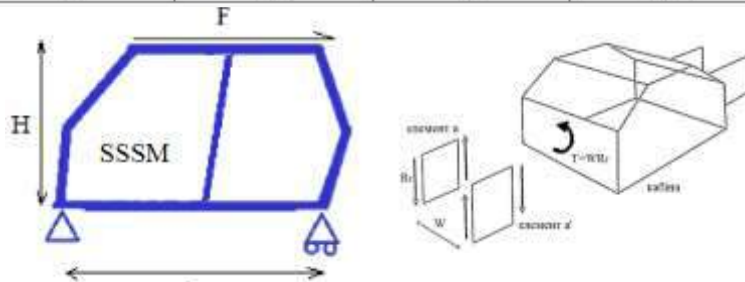
Граничні умови в усіх представлених моделях

## Деформація моделей під навантаженням на вигин

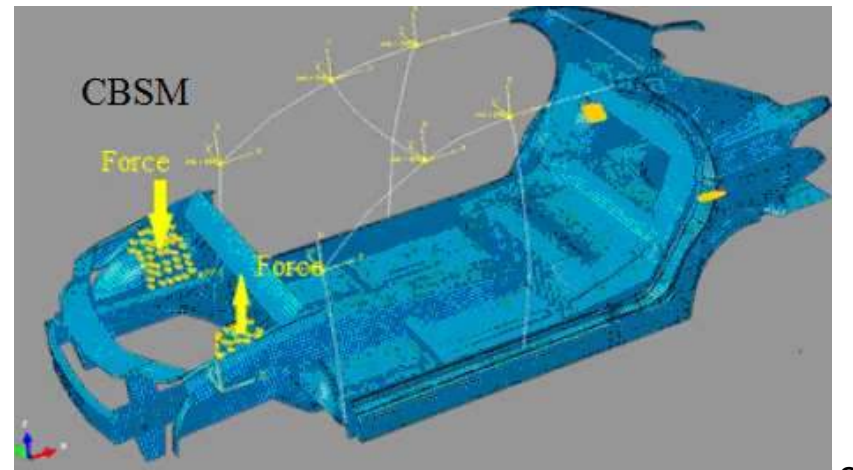
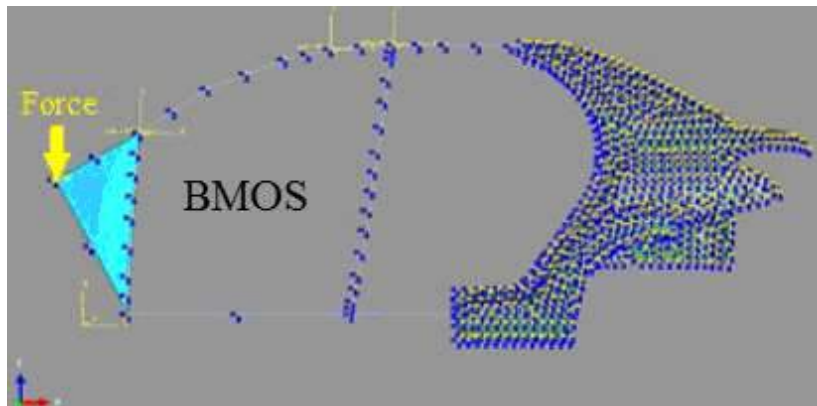
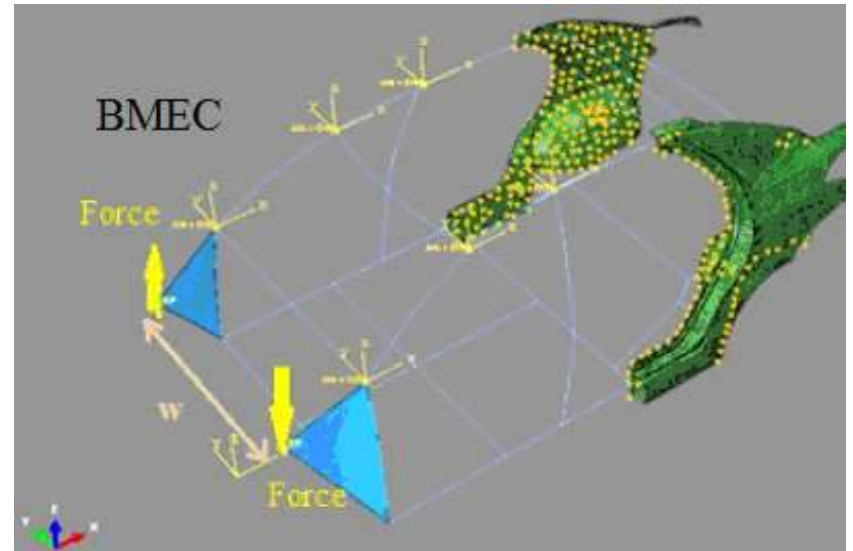
Метод	Жорсткість на вигин (Н/мм)	Відсоткова помилка, %
SSSM	7142	51,7
CBSM	12714	14,0
BMOS	12614	15,5
VMES	12714	14,7
цільове значення	14800	-

## Аналіз жорсткості на кручення: граничні умови

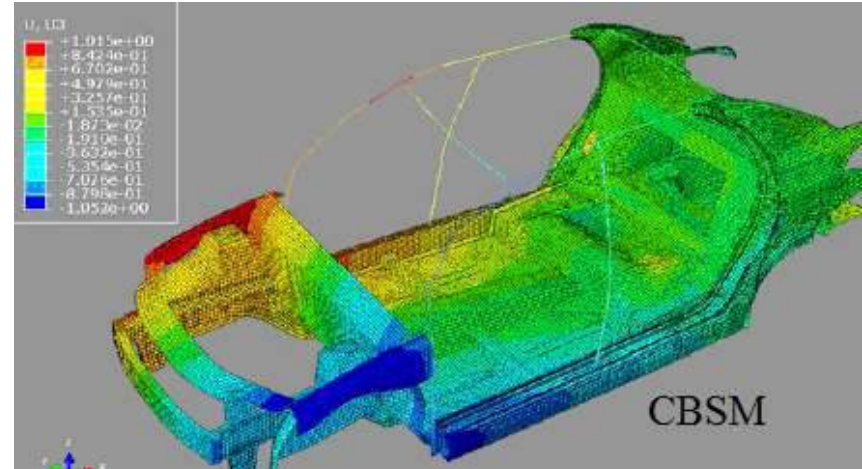
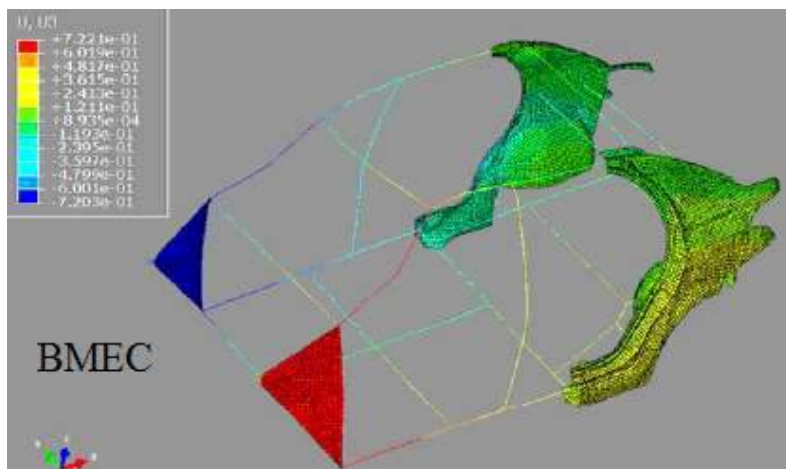
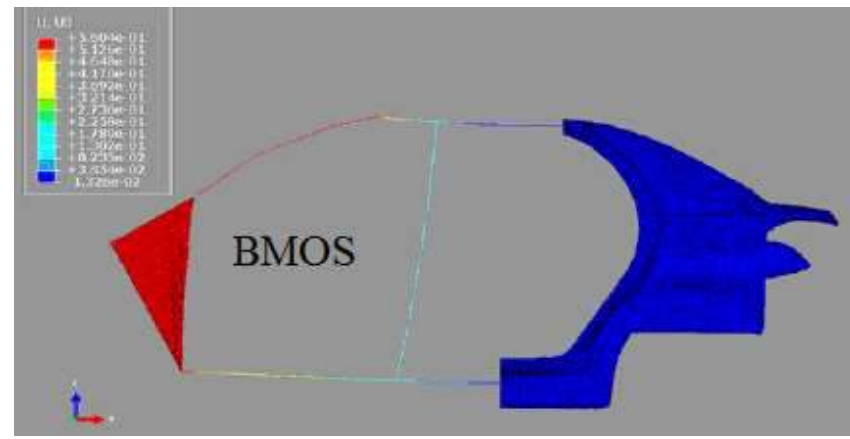
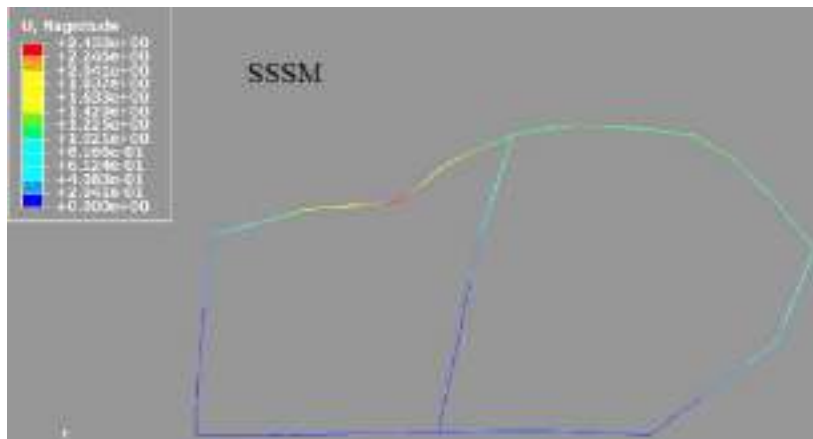
Геометричний параметр	Величина, мм	Геометричний параметр	Величина, мм
$L_S$	713	$h_1$	787
$L_B$	653	$h_2$	1015
$L_R$	1200	$W$	14151
$L_F$	1789	$H$	1181
$h_0$	1181	$L$	1789



$$\begin{bmatrix}
 h_1 & w & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 L_F & 0 & -w & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 L_R & 0 & 0 & -w & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 L_B & 0 & 0 & 0 & -w & 0 & 0 & 0 \\
 h_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & w & 0 & 0 \\
 L_F & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -w & 0 \\
 0 & 0 & 0 & (h_0 - h_1) [L_F(h_0 - h_2) + L_B(h_0 - h_1)] / L_B & -L_F & h_1 & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{Bmatrix}
 Q_1 \\
 Q_2 \\
 Q_3 \\
 Q_4 \\
 Q_5 \\
 Q_6 \\
 Q_7 \\
 Q_8
 \end{Bmatrix}
 =
 \begin{Bmatrix}
 T \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 T \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{Bmatrix}$$



## Аналіз жорсткості на кручення: Деформація моделей при крутильному навантаженні



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

# КАРКАС БЕЗПЕКИ СПОРТИВНОГО АВТОМОБІЛЯ

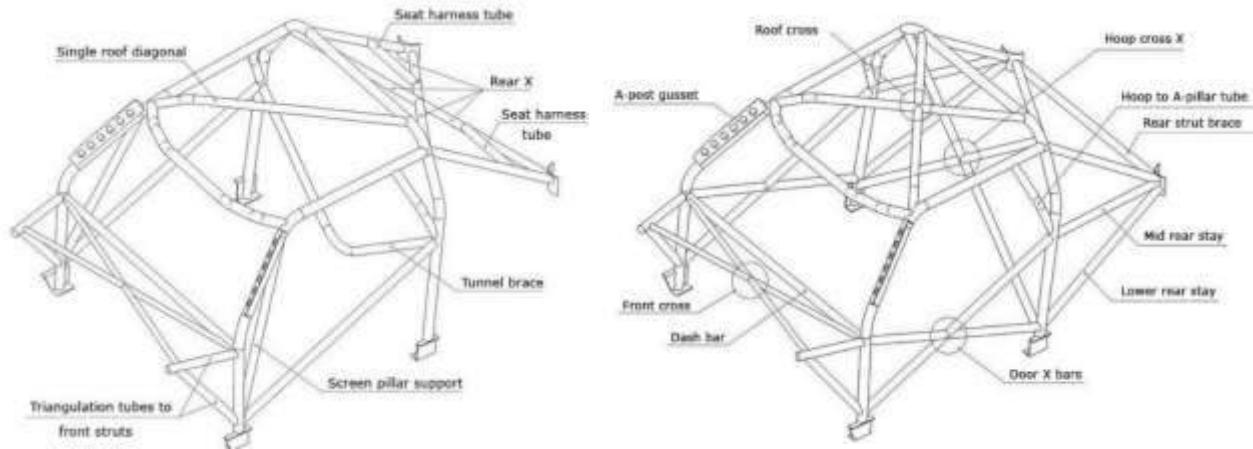
БОЛТОВИЙ



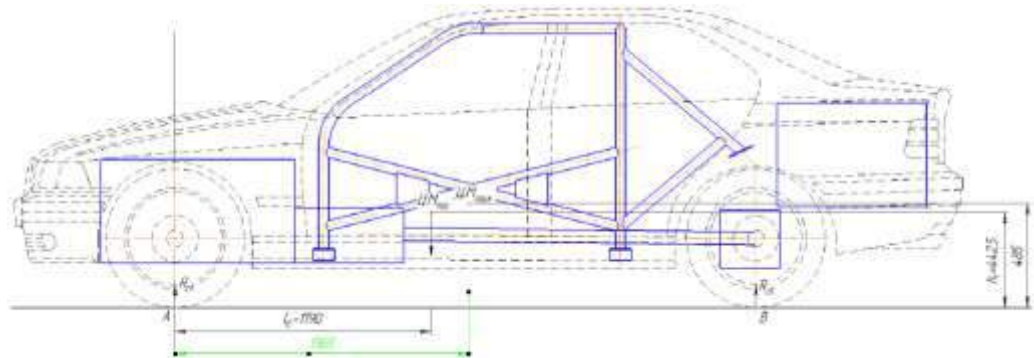
ЗВАРНИЙ



## Елементи каркасу безпеки



## Центри мас порожнього та завантаженого автомобіля

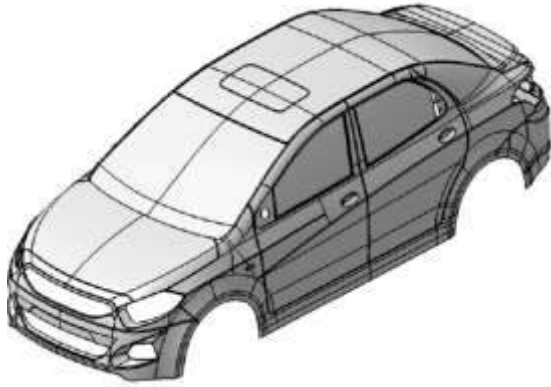


Матеріал	Мінімальна межа міцності	Розміри (мм)	Використання
Холоднокатана, нелегована вуглецева сталь (безшовна труба), що містить максимум 0,3% вуглецю	350 Н/мм <sup>2</sup>	45(1.75")x2,5 або 50(2.0")x2.0	Головна дуга, бічна дуга та їх з'єднання, залежно від конструкції.

Труби з'єднуються між собою за допомогою зварювання. Відповідно до вимог безпеки FIA, "переважне електродугове зварювання в середовищі захисного газу. Зварний шов повинен повністю оперізувати периметр труби"

## ВИСНОВКИ

- 1. Дах легкового автомобіля не підлягає обов'язковим випробуванням захисних властивостей при перекиданні. Перекидання (переворот) становлять приблизно 18% від усіх смертних випадків в аваріях. Позашляховики та спортивні автомобілі найбільш схильні до перекидання, особливо ті, що оснащені підвіскою для бездоріжжя. Збільшена висота підвіски збільшення кліренсу на бездоріжжі піднімає центр ваги.
- 2. Сучасні досягнення в області математичного моделювання, кінцево-елементних моделей, високої продуктивності обчислювальної техніки зробили можливим моделювання надзвичайно складних технічних систем і комплексів. Цифрові близнюки, побудовані на основі цих технологій, змінили багато підходів до інженерних розрахунків, а також до проектування та сертифікації.
- 3. Загальний відсоток похибок визначення жорсткості кузова автомобіля у всіх розглянутих моделях є відносно низьким, що ілюструє достовірність та адекватність моделювання несучої системи автомобілів.
- 4. Каркас кожної моделі розробляється індивідуально. Каркас для спортивних автомобілів продається у вигляді набору труб та інструкцій.



Дякую за увагу !

